

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»

(наименование кафедры)

11.04.04 – Электроника и наноэлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электронные приборы и устройства

(направленность (профиль)/специализация)

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Исследование влияния параметров полупроводникового компенсатора на качество компенсации различных нагрузок

Студент

Швецов Д. А.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

Глибин Е.С.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы \_\_\_\_\_

(ученая степень, звание, И.О.Ф.)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой

“Промышленная электроника” к.т.н., доцент А.А. Шевцов \_\_\_\_\_

(ученая степень, звание, И.О.Ф.)

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Тольятти 2017

## Содержание

Введение.....	3
1. Обзор устройств компенсации и их электрических схем.....	5
2. Моделирование полупроводникового компенсатора.....	33
2.1. Разработка модели компенсатора в MATLAB Simulink.....	33
2.2. Симуляция работы компенсатора на семейства нагрузок.....	43
3. Влияние параметров компенсатора на качество компенсации различных нагрузок.....	46
3.1 Построение зависимостей номиналов элементов компенсатора от параметров нагрузки.....	46
3.2. Аналитическое описание выявленных зависимостей.....	50
Заключение.....	88
Список использованной литературы.....	89

## Введение

В современных условиях дефицита энергоресурсов главенствующую роль приобретают проблемы энергосбережения. Стратегическая задача России – обеспечить к 2020 году снижение энергоемкости валового внутреннего продукта на 40%.

Огромное влияние на потери электрической энергии в сетях оказывает реактивная мощность, что приводит не только к увеличению потерь энергии, но и к снижению пропускной способности сетей, увеличению потерь напряжения и как следствие к снижению качества электрической энергии.

Для уменьшения реактивной мощности в электрических сетях и снижения негативных последствий, вызываемых ею, должна осуществляться компенсация реактивной мощности. Компенсация реактивной мощности обеспечивает соблюдение условия баланса реактивной мощности, способствует снижению потерь энергии в электрических сетях, увеличению их пропускной способности, а также позволяет осуществлять регулирование напряжения за счет применения компенсирующих устройств. Поэтому компенсация реактивной мощности может рассматриваться как достаточно актуальное и эффективное направление энергосбережения.

Реактивная мощность необходима для создания переменных магнитных полей в индуктивных нагрузках. Однако непосредственно полезную работу она не выполняет. Тем не менее, реактивная мощность оказывает значительное влияние на такие параметры системы электроснабжения, как потери мощности и электроэнергии, уровни напряжения в узлах электрической сети и повышает требования к энергоснабжающему оборудованию.

В целях снижения реактивной мощности в электрических сетях должна осуществляться компенсация реактивной мощности. В общем случае под компенсацией реактивной мощности понимается снижение реактивной мощности, циркулирующей между источником и потребляющими её нагрузками. Компенсация реактивной мощности обеспечивает соблюдение условия ба-

ланса реактивной мощности, снижает потери мощности и электроэнергии в сети, а также позволяет осуществлять регулирование напряжения посредством применения специальных компенсирующих устройств. Технические мероприятия по компенсации реактивной мощности заключаются в установке компенсирующих устройств в соответствующих точках системы электропитания.

### **Цели и задачи исследования**

Наиболее распространенными техническими средствами компенсации реактивной мощности являются:

1. конденсаторные батареи;
2. синхронные компенсаторы;
3. статические полупроводниковые компенсаторы.

Работа устройств зависит в значительной степени от нагрузки, компенсацию мощности которой они осуществляют.

Анализ средств компенсации и их электрических схем позволяет сформулировать цель диссертационной работы как построение зависимостей номиналов элементов электрической схемы полупроводникового компенсатора от параметров компенсируемой нагрузки.

Для достижения этой цели необходимо решить ряд важных задач:

1. Выполнить обзор существующих схем полупроводниковых компенсаторов.
2. Выбрать и разработать имитационную модель полупроводникового компенсатора.
3. Промоделировать работу схемы компенсатора в Simulink и построить зависимости номиналов элементов компенсатора от параметров нагрузки.

## 1. Обзор устройств компенсации и их электрических схем

Полупроводниковый компенсатор – полупроводниковый преобразователь электроэнергии, предназначенный для улучшения качества электроэнергии в сети переменного тока путем уменьшения сдвига первой гармоники тока и уменьшения искажений формы кривой тока или напряжения сети.

При применении полупроводниковых компенсаторов появляется возможность снижения энергопотребления на 20–40 %, что влечет за собой и снижение себестоимости продукции на 30 – 40%.

В отличие от активной реактивная мощность не совершает механической работы. Однако она необходима для работы реактивной нагрузки. Поэтому имеет смысл локализовать место её протекания непосредственно вблизи с оборудованием. В этом случае циркулируя мощности будет осуществляться уже не по всей энергосистеме, произойдет уменьшение потерь мощности на проводах и кабелях. В свою очередь это даст возможность подключения дополнительной нагрузки за счет снижения тока, потребляемого с силового трансформатора. Локализация протекания неактивных составляющих полной мощности лежит в основе компенсации неактивной мощности. Поэтому этот метод является одним из направлений решения вопроса энергосбережения. Меры принимаемые для компенсации реактивной мощности, помимо снижения затрат на электроэнергию увеличивают ресурс оборудования и уменьшают расходы компании.

Одним из способов снижения неактивных составляющих полной мощности является параллельное подключение к энергопотребителю компенсирующего конденсатора соответствующей мощности. При изменяющейся во времени нагрузке используются автоматические конденсаторные установки, коммутация которых осуществляется с помощью тиристорных ключей.

При этом компенсация происходит не одновременно с изменением параметров сети, а с определенной задержкой. Применение конденсаторных установок с переключающими ключевыми полупроводниковыми элементами

(тиристорами) приводит к появлению переходных процессов, снижающих качество напряжения в сети. Существенным недостатком является то, что подобные компенсаторы не обеспечивают компенсации реактивной мощности в нагрузке по высшим гармоникам.

Одним из решений проблем относится к мостовым компенсационным преобразователям переменного тока в постоянный с полностью управляемой коммутацией силовых вентилях в анодной и катодной группах. В анодной и катодной группах одну из обкладок конденсатора и коммутирующий вентиль подключают к неуправляемому выпрямителю, вторую обкладку и разделительный диод - к управляемому выпрямителю, а разделительные диоды и коммутирующие вентили к нагрузке.

Обеспечивается быстрое действие и генерация реактивной мощности при посадке напряжения при упрощении конструкции. При работе таких преобразователей на чисто индуктивную нагрузку (накопитель электромагнитной энергии) становится возможным плавное регулирование генерируемой реактивной мощности емкостного характера при изменении угла управления. Подобные преобразователи могут быть использованы в системах электроснабжения промышленных предприятий и в электрических сетях энергосистемы для компенсации реактивной мощности.

Наиболее близким к изобретению по технической сущности и достигаемым результатам является компенсационный преобразователь. Это полупроводниковый компенсатор реактивной мощности. Он содержит управляемый выпрямитель и неуправляемый выпрямитель, в катодной и анодной группах по коммутирующему вентилю, разделительному диоду и конденсатору с обкладками.

С целью повышения технико-экономических показателей, коммутирующий блок выполнен в виде однофазного моста, в двух противоположных плечах которого включены полностью управляемые электрические вентили, выполненные, например, в виде тиристоров с индивидуальными узлами принудительной коммутации, а в двух других - неуправляемые электрические

вентили, причем к зажимам переменного тока моста подключен емкостной фильтр, который состоит из нескольких секций конденсаторов, соединенных с помощью разделительных диодов, при зарядке эти секции включены последовательно, а при разрядке – параллельно. К нагрузке подключены катоды управляемых вентилях, а также катоды вентилях однофазного моста.

Имеются следующие недостатки:

- невысокое быстродействие из-за наличия колебательных контуров, включающих конденсатор, дроссель и диод;
- низкая способность генерации реактивной мощности при посадке напряжения из-за недостаточно запасенной энергии в колебательном контуре при пониженном напряжении питания;
- наличие группы вентилях зарядки фильтра ухудшает массогабаритные показатели устройства.

Актуальной является задача улучшения коммутирующих показателей и массогабаритных показателей компенсатора.

Технический результат - повышение быстродействия и способности к генерации реактивной мощности при посадке напряжения, а также упрощение конструкции.

Это достигается тем, что в полупроводниковом компенсаторе реактивной мощности, содержащем управляемый выпрямитель и неуправляемый выпрямитель, в катодной и анодной группах по коммутирующему вентилю, разделительному диоду и конденсатору, в катодной и анодной группах одна обкладка конденсатора и коммутирующий вентиль подключены к неуправляемому выпрямителю, вторая обкладка конденсатора и разделительный диод подключены к управляемому выпрямителю, а коммутирующие вентили и разделительные диоды подключены к нагрузке.

Отсутствие колебательных контуров обеспечивает быстродействие компенсатора. Повышенная способность генерации реактивной мощности при посадке напряжения обеспечивается за счет подключения неуправляемого выпрямителя с конденсаторами. Улучшаются массогабаритные показатели

за счет минимального количества конденсаторов и отсутствия колебательных контуров

Например, источником негативного влияния в системе тягового электроснабжения являются электровозы с зонно – фазным регулированием силы тяги, что объясняется работой выпрямительно – инверторного преобразователя.

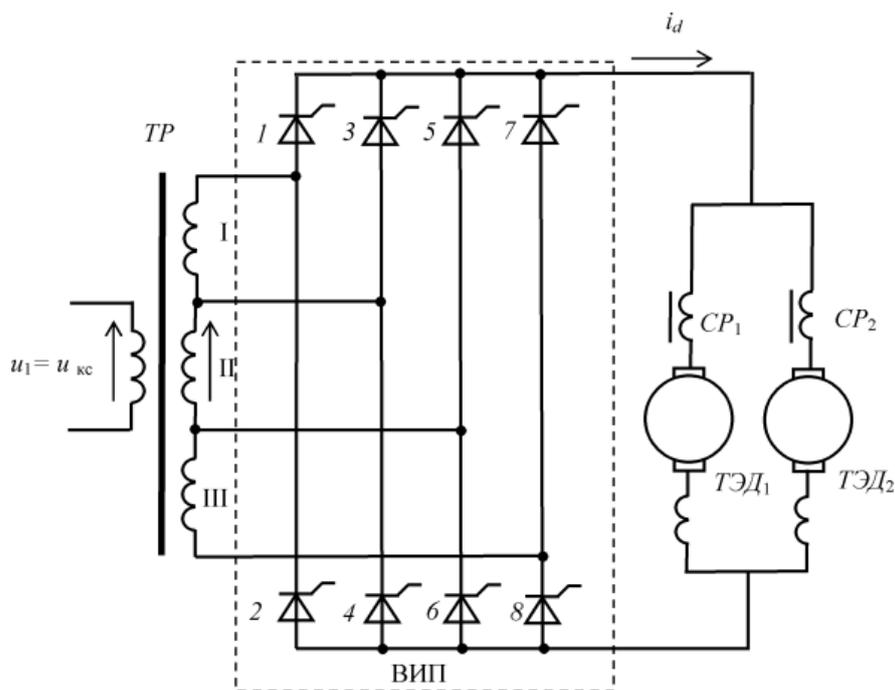


Рисунок 1.1 - Функциональная схема преобразователя.

На рисунке 1.1 представлена функциональная схема такого преобразователя, где  $I$ ,  $II$ ,  $III$  – секции вторичной обмотки трансформатора;  $1, 2 \dots 8$  – плечи;  $CP_1, CP_2$  – сглаживающие реакторы;  $TЭД_1, TЭД_2$  – тяговые двигатели

Для увеличения качества электроэнергии в системе электроснабжения используются: 1) пропуск полуволн напряжения в цепи тяговых электродвигателей; 2) изменение алгоритма управления преобразователем; 3) применение компенсирующих устройств.

Компенсирующие устройства могут быть установлены как на тяговых подстанциях и участках электроснабжения, так и непосредственно у потребителя (рисунки 1.2-1.4).

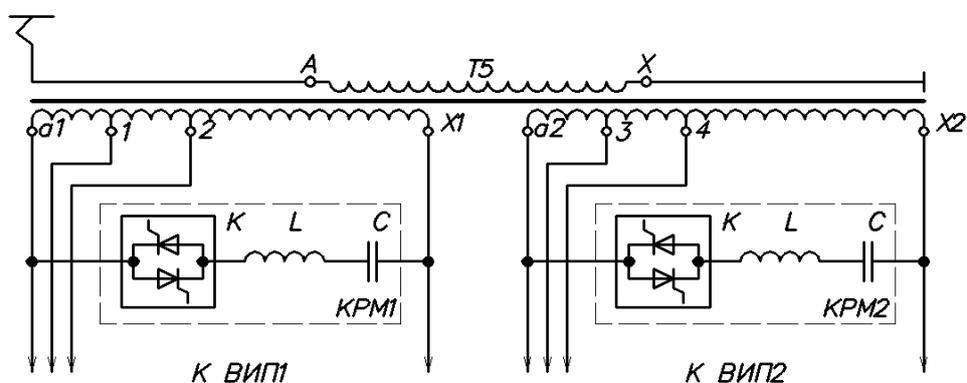


Рисунок 1.2 - Схема подключения пассивного компенсатора реактивной мощности

В процессе работы часть электроэнергии (в зависимости от зоны регулирования) возвращается обратно в сеть (реактивная составляющая). При установке КРМ, часть реактивной составляющей тока гасится внутри контура на емкости. В результате уменьшается сдвиг между первыми гармониками напряжения и тока потребляемого электровозом, снижается уровень высших гармоник, что способствует увеличению коэффициента мощности.

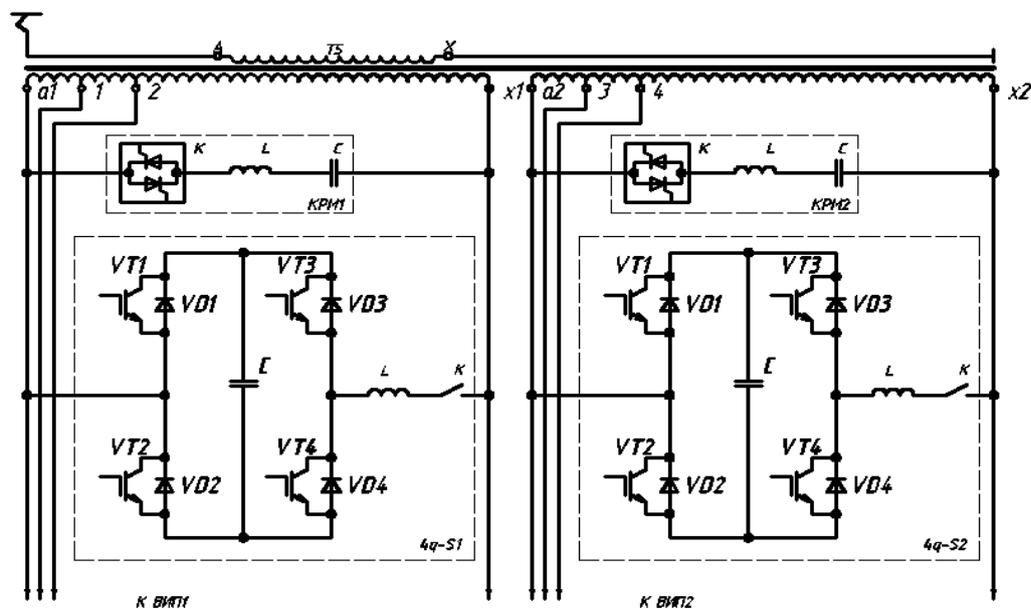


Рисунок 1.3 - Схема подключения гибридного компенсатора реактивной мощности

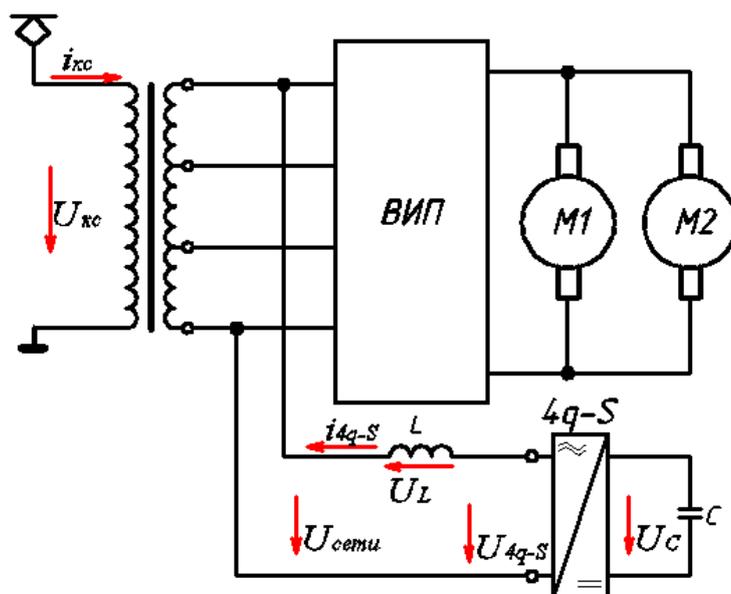


Рисунок 1.4 - Схема подключения 4q-S преобразователя

Сигналами обратной связи являются ток и напряжение на первичной обмотке трансформатора. В соответствии с принципом регулирования по отдельным гармоникам идентификаторы гармонического состава определяют амплитуды и фазы по каждой гармонике тока и напряжения. Полученные сигналы проходят через фильтры низких частот и подаются на регуляторы напряжения. Сложив сигналы напряжения, получим напряжение управления  $U_L$ , которое формируется 4q-S преобразователем. Применяются такие компенсаторы в системах тягового электроснабжения, состоящей из тяговой подстанции и элементов сети (контактная сеть, рельсовые цепи, компенсирующие устройства).

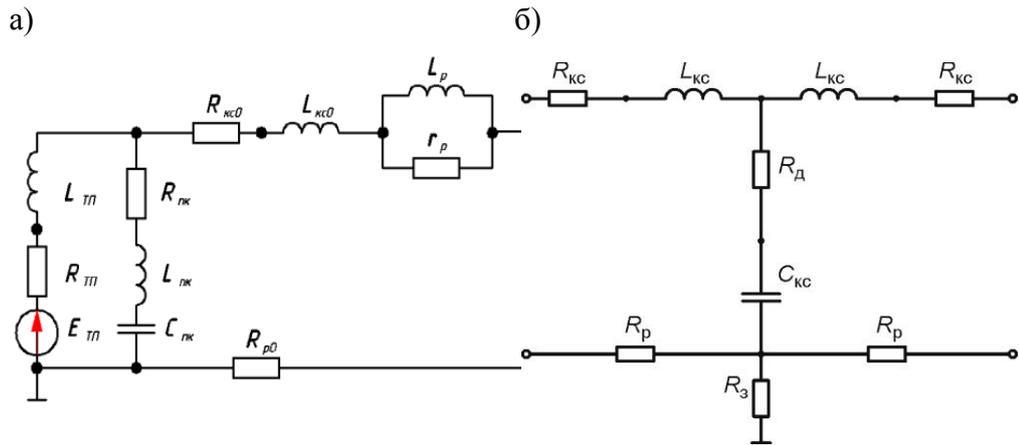


Рисунок 1.5 - Схемы тяговой подстанции (а) и участка тяговой сети (б) системы тягового электроснабжения переменного тока.

На рисунке 1.5 показаны схемы моделей элементов системы тягового электроснабжения. Где  $E_{ТП}$ ,  $R_{ТП}$ ,  $L_{ТП}$  – параметры тяговой подстанции;  $R_{ПК}$ ,  $L_{ПК}$ ,  $C_{ПК}$  – параметры поперечной компенсации;  $R_{КС}$ ,  $L_{КС}$ ,  $C_{КС}$  – параметры контактной сети;  $R_p$  – сопротивление рельсовой цепи;  $R_з$  – сопротивление растеканию тока в землю;  $L_p$ ,  $r_p$  - индуктивность и активное сопротивление эквивалентного контура, учитывающего вытеснение тока в рельсах.

На рисунке 1.6 представлена схема гибридного компенсатора, применяемого в железно-дорожном транспорте.

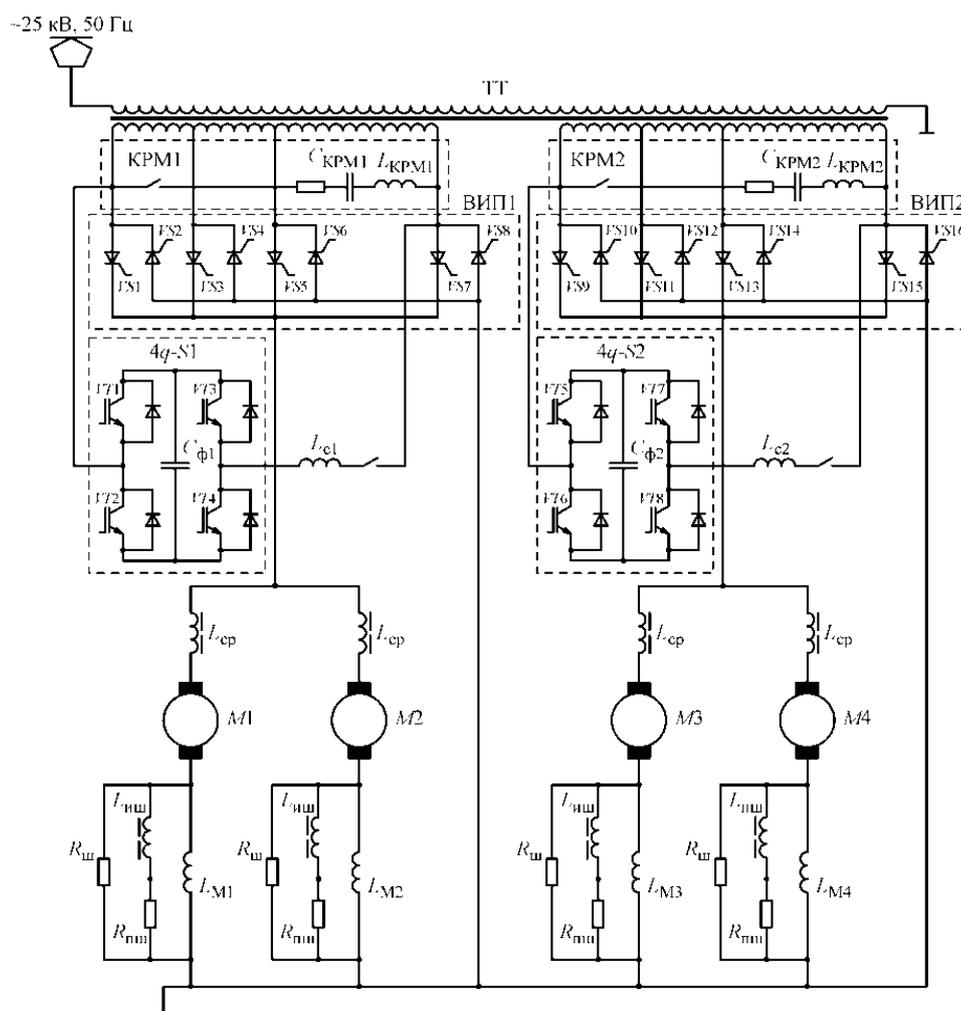


Рисунок 1.6 – Схема гибридного компенсатора

Существенные реактивные нагрузки становятся причиной понижения напряжения в электросети и ухудшения качества электропитания. Помимо того, чрезмерно нагружаются линии электропередач и трансформаторное оборудование, в результате чего увеличиваются капитальные затраты на обустройство и эксплуатацию электrorаспределительных станций.

Передача электрической энергии с использованием переменного тока началась еще в конце 19 века, заменяя существовавшие небольшие локальные системы постоянного тока. При расширении локальных систем энергоснабжения и обеспечении передачи на дальние расстояния возникали различные проблемы с управлением напряжением и стабильностью, связанные в первую очередь с небалансом реактивной мощности в системах. Для управления напряжениями стационарной системы в основном использовалась

коммутируемая компенсация реактивной мощности (шунтирующие конденсаторы и шунтирующие реакторы). Динамическая компенсация реактивной мощности основывалась на вращающихся машинах, например синхронных компенсаторах.

В середине 60 – х годов 20 века появились первые статические компенсирующие устройства реактивной мощности, то есть реакторы, управляемые постоянным током (ртутные вентили) и устройства, управляемые тиристорами (конденсаторы с тиристорным управлением, реакторы с тиристорным управлением). Малое время отклика, низкие потери и меньшие требования к техническому обслуживанию сняли многие ограничения, присущие вращающимся машинам и устройствам, управляемым постоянным током. Оценка рабочих потерь имеет своим результатом всё большее увеличение использования статических конденсаторных установок реактивной мощности, состоящих из комбинаций ветвей конденсаторов и реакторов с тиристорным управлением. Эти шунтирующие устройства совместно с последовательными конденсаторами с тиристорным управлением составили основу гибких систем передачи переменного тока (FACTS). FACTS позволяет более эффективно использовать системы передачи благодаря улучшенному динамическому управлению напряжением системы с одной стороны и более высокой пропускной способностью с другой стороны. В системах передачи переменного тока в настоящее время установлены статические конденсаторные установки реактивной мощности общей мощностью более 100000 МВА.

В устройствах FACTS стали использоваться новые силовые электронные приборы (GTO, IGCT, IGBT), которые позволяют использовать преобразователи тока и напряжения для обеспечения быстродействующей компенсации реактивной мощности. На основе дальнейшего развития систем управления, совершенствования полупроводниковых приборов и новых технологий преобразователей напряжения в настоящее время компенсация реактивной мощности является ключевым фактором для надёжной передачи энергии переменного тока. В данной главе вашему вниманию предлагается обзор поло-

жений в области систем передачи от начала применения компенсации реактивной мощности до существующего в настоящее время положения. Также сравниваются ранние решения и современные устройства, приводятся основные факторы и этапы совершенствования установок и обсуждаются преимущества современных устройств.

Передача энергии переменного тока началась в конце 19 века. Развитие шло от низких уровней напряжения и ограниченных районов до больших расстояний, высоких мощностей и всё более возрастающего напряжения передачи. На рисунке 1.7 приводится примерная картина возрастания напряжения систем передачи от года к году.

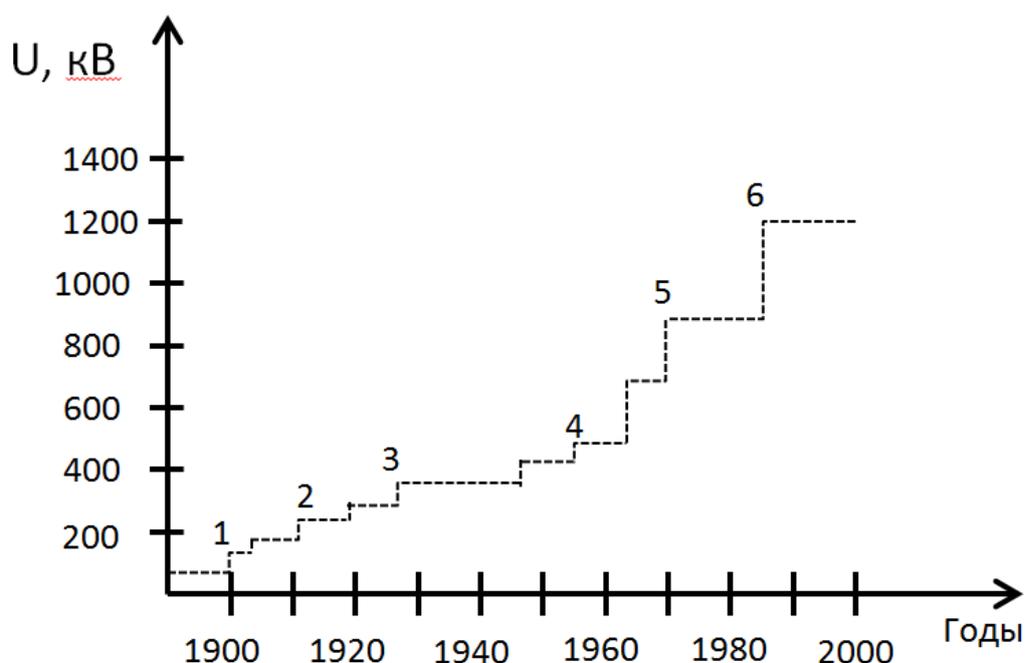


Рисунок 1.7. Увеличение напряжения систем передачи от года к году

- 1 – 1911 г., 110 кВ, Лауххаммер – Риза, Германия
- 2 – 1929 г., 220 кВ, Браувайлер – Хохенек, Германия
- 3 – 1932 г., 287 кВ, Булдер Дам – Лос Анджелес, США
- 4 – 1952 г., 380 кВ, Харспронгет – Халсберг, Швеция
- 5 – 1965 г., 735 кВ, Маникуаган – Монреаль, Канада
- 6 – 1985 г., 1200 кВ, Экибастуз – Кокчетав, СССР

Генерация электрической энергии и её потребители обычно не находятся близко друг от друга. Большие города и большие промышленные регионы часто получают электроэнергию от источников, находящихся на большом расстоянии. Составляющие системы и нагрузка включают в себя источники реактивной мощности (конденсаторы и катушки индуктивности), которые оказывают влияние на профиль напряжения сети и стабильность системы. Линии передачи высоковольтных систем (735 кВ) могут иметь до 200 Мвар емкостной мощности на длину 100 км. Кабельные соединения могут давать даже большую реактивную мощность. Большие нагрузки, содержащие электрические дуговые печи или мощные приводы, могут иметь до 100 Мвар индуктивной реактивной мощности. Без соответствующей компенсации реактивной мощности в длинных линиях передачи могут наступить критические условия работы системы из-за сильных колебаний напряжения и проблем со стабильностью. Эти проблемы могут быть решены с помощью схем параллельной и последовательной компенсации.

Выгода применения установки компенсации реактивной мощности

Огромное количество потребителей электроэнергии постоянно нагружает сеть реактивной составляющей потребляемой мощности, причем эта нагрузка постоянно возрастает. Внедрение компенсирующих устройств реактивной мощности позволяет повысить надежность электропитающих сетей и увеличить пропускную способность энергосистемы.

Среди целого ряда преимуществ от применения устройств компенсации реактивной мощности можно выделить пять главных:

- Экономия энергопотребления

Внедрение компенсирующих устройств реактивной мощности дает существенный экономический эффект. Снижение уровня энергопотребления может составить до 40 – 50% от общего объема. При таких объемах срок окупаемости систем компенсации мощности составит не более одного года.

- Увеличение срока службы оборудования

Средства компенсации увеличивают срок службы силовых трансформаторов, поскольку их использование снижает нагрузку на оборудование. Использование установок компенсации реактивной мощности также снижает нагрузку на линии передач и нагрев проводов, что позволяет использовать токоведущие жилы меньшего сечения.

- Экономия затрат на устройство подводящих электросетей

На этапе проектирования и строительства новых зданий монтаж системы компенсации реактивной мощности позволяет существенно сэкономить на обустройстве распределительной электросети.

- Улучшение качества энергоснабжения

Применение средств компенсации реактивной мощности дает возможность подавить сетевые помехи, избежать глубокой просадки напряжения и минимизировать несимметрию фаз. Кроме того, системы компенсации реактивной мощности в составе пассивных фильтров позволяют снизить уровень высших гармоник.

- Отсутствие штрафов

Устройство компенсации реактивной мощности позволяет избежать штрафных санкций от поставщика электроэнергии за ухудшение показателей коэффициента мощности.

### **Поперечная компенсация реактивной мощности**

В настоящее время используются коммутируемые конденсаторные установки для компенсации реактивной мощности и конденсаторные установки с непрерывным управлением. Емкостная мощность линий передачи или кабельной сети частично компенсируется параллельным шунтом из подключенных к линии реакторов, индуктивные нагрузки компенсируются шунтирующими конденсаторами. Линейные реакторы постоянно подключены к линиям передачи, чтобы обеспечить постоянную компенсацию в широком рабочем диапазоне. Шунтирующие конденсаторы обычно разделены на ступени для компенсации промежуточных нагрузок. Непрерывное управление реактивной мощностью ранее было возможно только с помощью регулиро-

вания возбуждения генераторов или специальных синхронных конденсаторных установок. Первые устройства статической компенсации строились на основе насыщенных реакторов, следующими были тиристорные установки. Основой последних устройств компенсации реактивной мощности стали преобразователи напряжения, использующие сначала запираемые тиристоры (GTO), а сейчас биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

#### А. Синхронные компенсаторы

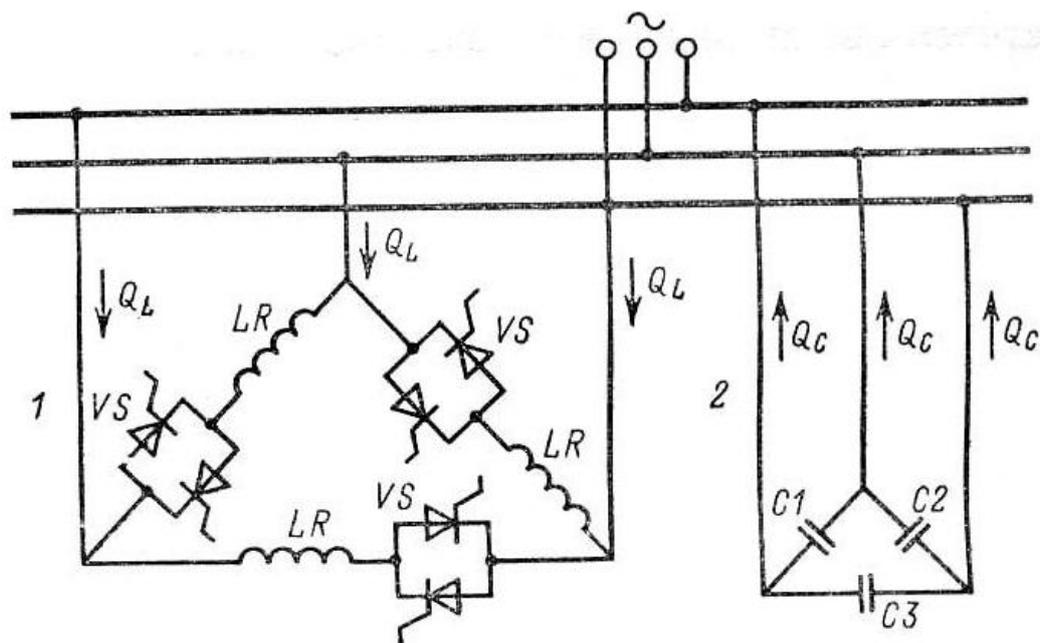


Рисунок 1.8. Принципиальная схема синхронного компенсатора

Поведение синхронного компенсатора определяется влиянием МДС возбуждения на реактивную мощность. В некоторых случаях с целью экономии средств для управления реактивной мощностью используются старые генераторы, демонтированные с турбин. Вновь изготовленные синхронные компенсаторы использовались в конкретных местах системы для улучшения профиля напряжения и увеличения мощности короткого замыкания особенно в точке подключения высоковольтных вставок постоянного тока. Время отклика машин было улучшено с внедрением систем возбуждения с управлением с помощью тиристоров. На рисунке 1.8 показана схема подключения синхронного компенсатора к системе высокого напряжения.

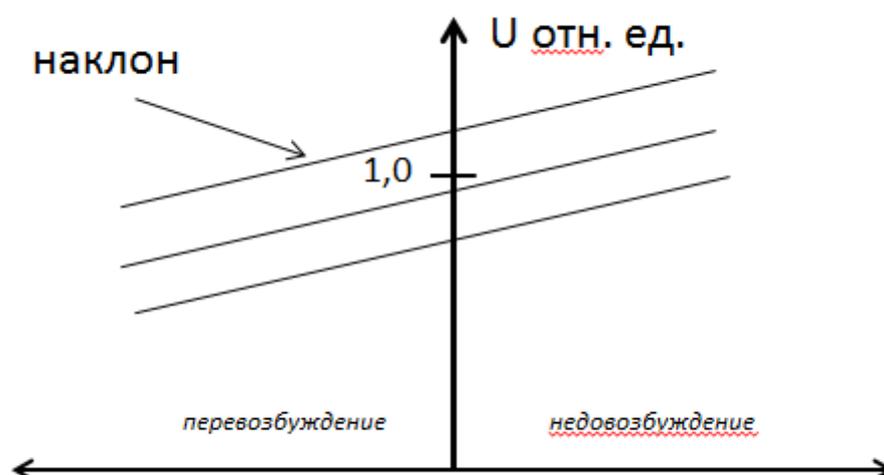


Рисунок 1.9. Вольт – амперная характеристика синхронного компенсатора

На рисунке 1.9 показана вольт – амперная рабочая характеристика. Наклон характеристики зависит от реактивного сопротивления двигателя и его сетевого трансформатора. Изменение опорного напряжения приводит к работе синхронного компенсатора в перевозбуждённом или недовозбуждённом режиме, то есть он отдаёт (как ёмкость) или поглощает (как индуктивность) реактивную мощность. Он реагирует сам, то есть без управляющего воздействия, и обеспечивает поддержание напряжения вне рабочей характеристики в установившемся режиме в условиях переходного процесса.

#### *В. Статические компенсаторы на основе насыщающихся реакторов*

Эти первые статические компенсаторы строились из статических (неподвижных) компонентов, то есть конденсаторов и реакторов. Реакторы работали в области насыщения, ограничивая при этом изменения напряжения. На рисунке 1.10 показано устройство такого компенсатора и его рабочие характеристики.

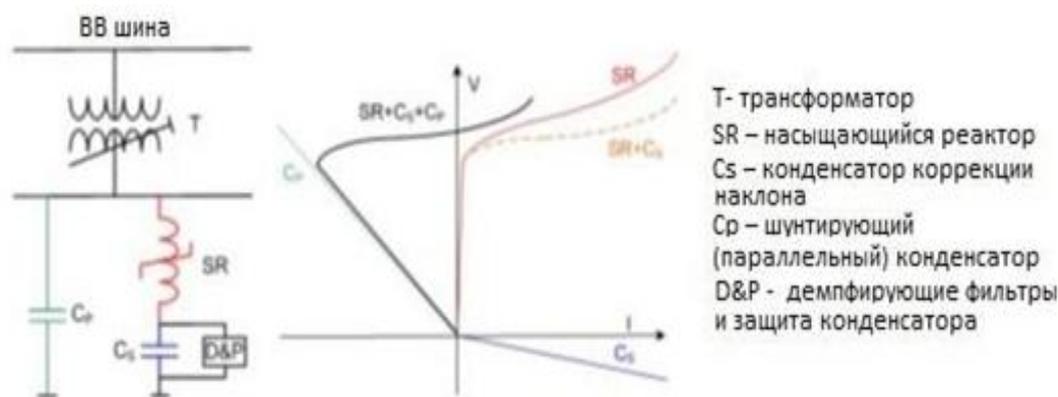


Рисунок 1.10. Схема статического насыщающегося компенсатора

Насыщающийся реактор (SR) обычно выполняется на 9-стержневом стальном магнитопроводе для нейтрализации гармоники третьего порядка. Наклон характеристики SR уменьшается благодаря конденсатору  $C_s$ , подключенному последовательно. Параллельно им подключен шунтирующий конденсатор  $C_p$ , который обеспечивает емкостной характер устройства. В правой части рисунка 1.10 показана характеристика каждого компонента (SR,  $C_s$  и  $C_p$ ), суммарная характеристика SR и  $C_s$  ( $SR+C_s$ ) и окончательная характеристика  $SR+C_s+C_p$  после параллельного подключения  $C_p$ . Насыщающиеся статические компенсаторы по существу реагируют на изменения напряжения системы. Регулировка опорного напряжения производится при помощи переключателя ответвлений сетевого трансформатора. Демпфирующие фильтры подключаются параллельно конденсатору  $C_s$  для устранения возможности феррорезонанса совместно с защитой от перенапряжения конденсатора. Общий рабочий диапазон может быть установлен ступенчатым переключением шунтирующих конденсаторов. Статический компенсатор нормально работает в условиях симметричного напряжения системы.

### *С. Статические компенсаторы реактивной мощности*

Статические конденсаторные установки реактивной мощности составлены из статических компонентов (индуктивностей и емкостей), с быстродействующим управлением с помощью полупроводниковых устройств (тиристоров). Преимуществами статических компенсаторов по сравнению с синхронными компенсаторами являются более низкие требования к техниче-

скому обслуживанию (нет движущихся частей), простое трёхфазное или однофазное управление, другие опциональные возможности управления, а также меньшая стоимость при тех же номинальных параметрах. На рисунке 1.11 показано типовое устройство статического компенсатора.



Рисунок 1.11. Линия одиночная статической конденсаторной установки

Необходимая емкостная мощность для системы может быть установлена в емкостных ветвях, которые могут быть фиксировано подключенными к шине низкого напряжения или коммутируемыми с помощью тиристорных вентилях (конденсаторы с тиристорной коммутацией). Фиксированные ветви обычно настраиваются с помощью последовательных реакторов для фильтрации гармоник. Индуктивная мощность устанавливается в одной фазе или комбинациях трёхфазных реакторов, которые плавно регулируются с помощью тиристорных вентилях. Ветви подключены к высоковольтной системе через специальный трансформатор. Трансформатор изменяет напряжение системы до уровня, оптимального для работы тиристора.

#### Ветви реакторов с тиристорным управлением (TCR)

Ветви реакторов с тиристорным управлением содержат реакторы, которые управляются по углу с помощью тиристорных ключей. Три однофазные ветви соединяются в треугольник для уменьшения генерации гармоник, кратных трём, при симметричной работе.

## Ветви конденсаторов с тиристорной коммутацией (TSC)

Ветви конденсаторов с тиристорной коммутацией содержат конденсаторы и токоограничивающие реакторы и коммутируются с помощью тиристорных ключей. Ветви могут соединяться треугольником или звездой. При соединении звездой один ключ становится лишним и может не приниматься во внимание в одной из трёх фаз. При использовании тиристоров с таким же номинальным током, как для TCR, номинал ветви будет соответственно ниже.

## Тиристоры

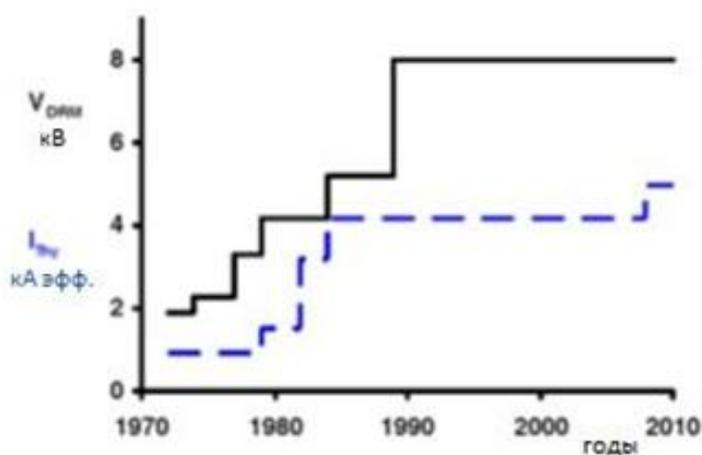


Рисунок 1.12. Улучшение параметров тиристоров от года к году

Развитие технологий тиристоров большой мощности создало основу использования электронных устройств большой мощности в энергосистемах.

Процесс совершенствования тиристоров (рисунок 1.12) начался в 70-х годах. Токопроводящая способность мощных тиристоров ступенчато возрастала от 800 А (эфф.) до 4000 А (эфф.) при использовании кремниевых подложек с диаметром от 40 до 125 мм. При этом величина максимально допустимого обратного напряжения увеличилась с 1,6 до 8 (10) кВ. Следующий этап дальнейшего увеличения номинальных токов тиристоров ожидается с 2009 г.

## Конфигурации статической конденсаторной установки

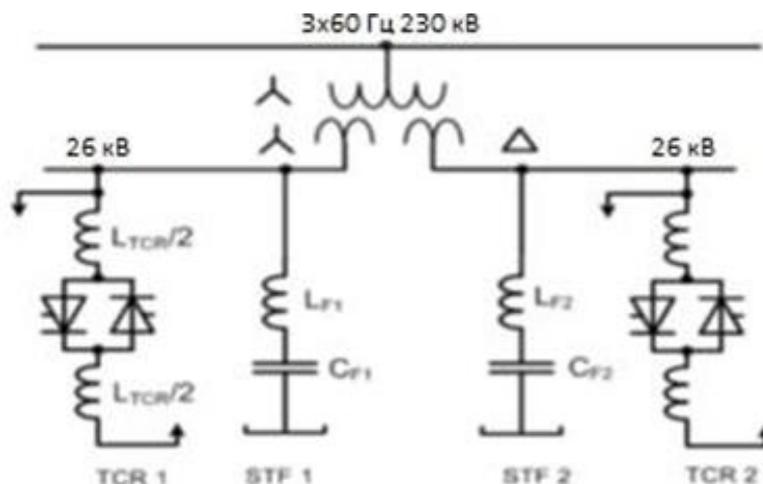


Рисунок 1.13. Статический компенсатор реактивной мощности в 12-пульсном соединении

Вначале в статических конденсаторных установках для соответствия условиям работы различных цепей, управляемых тиристорами, они устанавливались параллельно. Последовательное подключение тиристором обуславливалось напряжением шины низкого напряжения (обычно до 36 кВ). 12-пульсное подключение использовалось для разделения ветвей, управляемых тиристорами, и уменьшения тока короткого замыкания цепи каждого вентиля, а также чтобы избежать 6-пульсных гармонических искажений в системе. На рисунке 13 показан типовой статический компенсатор реактивной мощности в 12-пульсном соединении, использующий только одну ветвь TCR и фиксированную емкостную ветвь (FC).

### Конфигурации TCR/TSC

Конфигурации статических компенсаторов изменялись со временем по мере повышения номинальных токов и в связи с обсуждающимися далее факторами, связанными с потерями, занимаемой площадью и мобильностью.

### Потери

Величины потерь в статических компенсаторах с конфигурацией TCR/FC показаны на рисунке 1.14. Значение потерь не включает в себя нагрузку, потери трансформатора, потери реактора с тиристорным управлением и реактора фильтра, диэлектрические потери конденсаторов, потери в

ключая, как в стационарном режиме, так и при переключении, потери в оборудовании охлаждения (трансформатор и вентили) и во вспомогательном оборудовании.

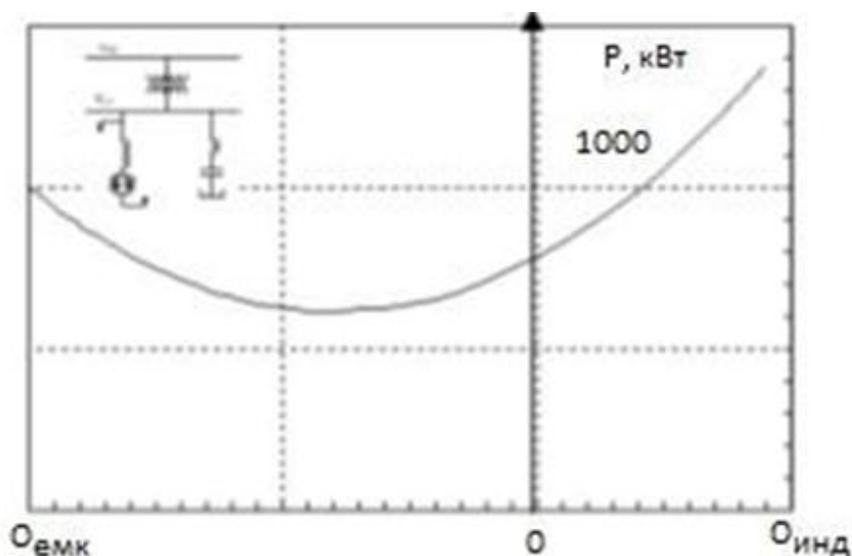


Рисунок 1.14. Величины потерь в статических компенсаторах с конфигурацией TCR/FC

Средняя величина рабочих потерь в статических компенсаторах с конфигурацией TCR/FC составляет около 0,5 – 0,7% номинальной емкостной мощности. На рис. 1.15 показан график рабочих потерь установки с конфигурацией TCR/TSC/FC.

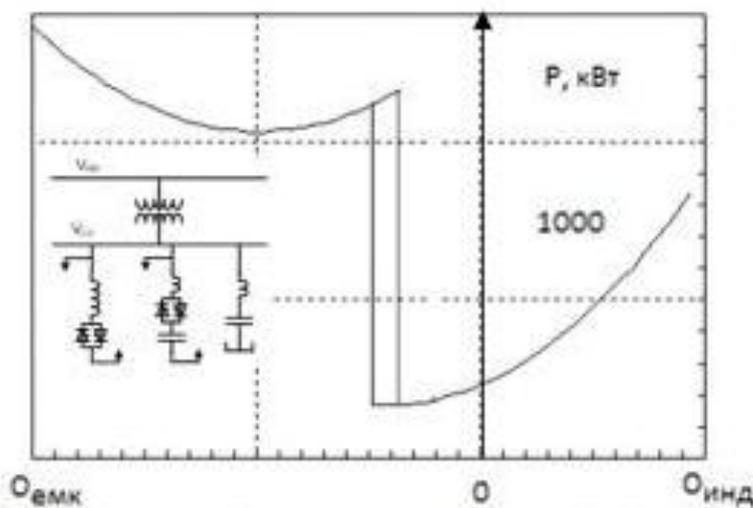


Рисунок 1.15 – Потери статического компенсатора конфигурации TCR/TSC/FC

Средняя величина рабочих потерь в статических компенсаторах конфигурации TCR/TSC/FC составляет около 0,5 – 0,7% номинальной емкостной мощности компенсатора. Стоимость конфигурации компенсатора TCR/TSC/FC выше, чем конфигурации TCR/FC за счёт дополнительной стоимости конденсаторов с тиристорной коммутацией. Из-за того, что статический компенсатор должен работать основную часть времени при нуле на выходе, чтобы быть готовым к быстрому поддержанию напряжения при нештатных ситуациях в системе, стоимость потерь должна определяться в рабочей области.

Возможна следующая методика оценки (рисунок 1.16):

$$P_{\text{veal}} = P_{v1} \times t1 + P_{v2} \times t2 + \dots + P_{vn} \times t_n,$$

где  $P_{\text{veal}}$  – значение общих рабочих потерь,

$P_{v1, 2, n}$  – средние потери в рабочем диапазоне 1, 2, n для периодов работы  $t1, t2, t_n$ .

Суммарное время работы – до 8760 часов за год. Стоимость потерь определяется умножением  $P_{\text{veal}}$  на конкретную стоимость потерь (\$/кВт) у потребителя, величина которой зависит от поставщика электроэнергии от 1500 до 8000 \$/кВт.

Общая стоимость компенсации реактивной мощности состоит из стоимости инвестиций (составные части, установка) и стоимости потерь. Решение статического компенсатора конфигурации TCR/TSC/FC может оказаться более экономичным, чем более простое – TCR/FC. Последние установки статических компенсаторов реактивной мощности в основном имели конфигурации TCR/TSC/FC.

#### Занимаемая площадь

Несмотря на то, что конфигурации TCR/TSC/FC требуют больше места, так как имеют больше ветвей, требования по площади размещения могут быть уменьшены более чем на 50% (в настоящее время – до 8 м<sup>2</sup>/Мвар) по сравнению с ранними конструкциями. Требования по занимаемой площади также могут использоваться в качестве критерия оценки.

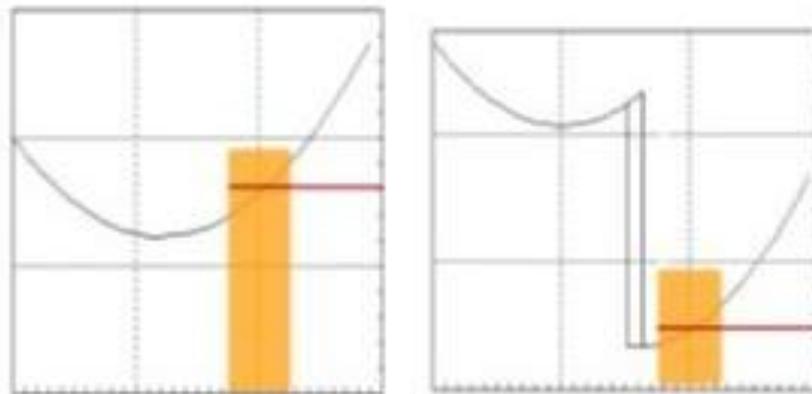


Рисунок 1.16 – Оценка рабочих потерь

### Мобильность

Процессы либерализации и приватизации могут приводить к изменениям потоков в некоторых высоковольтных системах в течение короткого времени. Некоторые ранее установленные конденсаторные установки реактивной мощности могут оказаться больше не эффективными в данном месте, и может потребоваться их установка в другой точке системы. Возможность перемещения установки также может быть использована в качестве критерия при оценке общей стоимости.

### Переход от аналогового управления к цифровому

Со временем происходил переход от чисто аналоговых систем управления и защиты к цифровым системам. Преимуществами цифровых систем являются отсутствие дрейфа параметризации и сигнализации, программное управление функциональностью, графическое конфигурирование, самодиагностика и модульное построение. Современные системы управления конденсаторных установок имеют многообразные функции и позволяют полностью интегрироваться в систему. На рисунке 1.17 показана схема блока управления, включающего в себя различные функции управления и замкнутую петлю обратной связи.

Выделенная на рисунке часть схемы показывает прохождение сигнала управления напряжением. Сигнал управления напряжением может быть модулирован быстродействующим сигналом управления для подавления кача-

ний мощности (POD) в случае серьёзных проблем со стабильностью после аварии системы. Замедленное действие тракта управления реактивной мощностью помогает статической конденсаторной установке оперировать из заданной оптимальной рабочей точки, например 0 Мвар. Из этой оптимальной рабочей точки конденсаторная установка сможет быстро отдавать или поглощать реактивную мощность в критических условиях работы системы.



Рисунок 1.17 – Система управления компенсатором

#### D. Преобразователи напряжения

Идея применить самокоммутирующиеся преобразователи для статической компенсации реактивной мощности долго обсуждалась перед созданием в 70-е годы 20 века первой конструкции на тиристорах со специальной схемой для ускорения коммутации. В принципе, могут быть использованы преобразователи с фиксированным постоянным напряжением или током. Тем не менее, при поддержке других отраслей, например, систем электроприводов, стал доступен широкий ряд полупроводниковых приборов с управляемым запирающим и полным максимальным обратным напряжением. В первых экспериментальных образцах статических компенсаторов STATCOM на базе преобразователей напряжения были использованы запираемые тиристоры (GTO).

На векторной диаграмме, на рисунке 1.18, показан емкостной характер работы. Фаза и амплитуда тока могут регулироваться изменением VVSC. Для

данного напряжения системы  $V_N$  регулируется напряжение преобразователя VVSC, чтобы получить ток  $I_N$ , который может находиться внутри зоны, обозначенной «максимальный ток преобразователя». Если пренебречь потерями, можно считать, что ток опережает напряжение или отстаёт от напряжения на  $90^\circ$ . Значение максимального тока симметрично при опережении или отставании по фазе. В широком диапазоне изменения напряжения системы ток может оставаться неизменным.

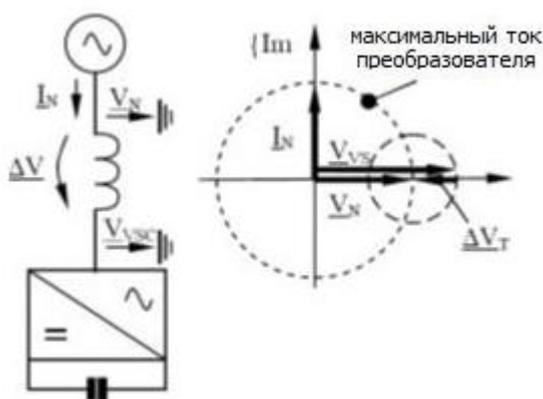


Рисунок 1.18 – Принцип работы преобразователя напряжения

В условиях низкого напряжения STATCOM может обеспечить большую мощность, чем СКРМ, а при перенапряжении максимальная выходная мощность STATCOM меньше.

Развитие технологий преобразователей напряжения для компенсации реактивной мощности было нацелено на следующие задачи: улучшение поддержания работы системы в случае понижения напряжения, повышение скорости отклика при компенсации фликеров, создание более компактных и мобильных конструкций, уменьшение взаимного влияния гармоник с системой энергоснабжения. В настоящее время предлагается много технических решений, которые сводятся к концепции мультипреобразования, высоковольтным ШИМ-преобразователям или многоуровневым преобразователям. Причины сложившейся ситуации и перспективы можно увидеть из истории развития. В первых преобразователях напряжения количество последовательно соединённых запираемых тиристоров было ограничено в основном тем, что нельзя

было обеспечить равномерное распределение напряжений между отдельными тиристорами. Это приводило к тому, что выходная мощность одиночного преобразователя была мала. Также высокие потери при коммутации препятствовали эффективному использованию широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для получения синусоидальной формы тока. Эти ограничения были впервые преодолены сочетанием нескольких преобразователей при использовании подавления гармоник с помощью магнитных цепей.

Позднее появились полупроводниковые приборы с улучшенной коммутационной способностью. С внедрением коммутируемых по затвору запираемых тиристоров (IGCT) были созданы мощные преобразователи с номинальными мощностями до 10 МВА. С использованием высоковольтных биполярных транзисторов постоянного тока с изолированным затвором (IGBT) были созданы вентили на 300 кВ, что дало возможность реализации одиночных преобразователей диапазона 100 МВА.

В преобразователях на IGBT выходной синусоидальный ток формируется с помощью ШИМ с высокой частотой коммутации (в килogerцовом диапазоне). Кроме того факта, что высокая частота коммутации ведёт к значительным потерям преобразователя, наличие крутых фронтов высокого напряжения  $dv/dt$  требует применения специального оборудования для предотвращения воздействия высокой частоты и принятия мер по ограничению электромагнитных помех.

Дальнейшее увеличение предложения полупроводников высокой мощности и эффективных систем управления позволяют сегодня преодолевать проблемы, связанные с высокой частотой коммутации высоковольтных вентилях. Системы преобразования, появившиеся в последнее время, имеют модульное построение и генерируют выходное напряжение переменного тока, близкое к синусоидальному с большим количеством уровней напряжения (многоуровневые преобразователи).

На рисунке 1.19 показана конфигурация однофазного преобразователя, используемого для компенсации реактивной мощности. Три таких устрой-

ства могут быть соединены в треугольник. Напряжения и токи многоуровневых преобразователей аналогичны напряжениям и токам синхронных компенсаторов, но многоуровневые преобразователи имеют намного меньшие времена отклика. Благодаря сниженному взаимному влиянию гармоник с подключенной системой многоуровневые преобразователи на преобразователях напряжения по сравнению с другими типами статических компенсаторов имеют меньше компонентов и проще встраиваются в системы энергоснабжения. Потери энергии многоуровневого преобразователя значительно меньше по сравнению с преобразователями других типов, но всё-таки несколько больше, чем у компенсаторов на тиристорах.

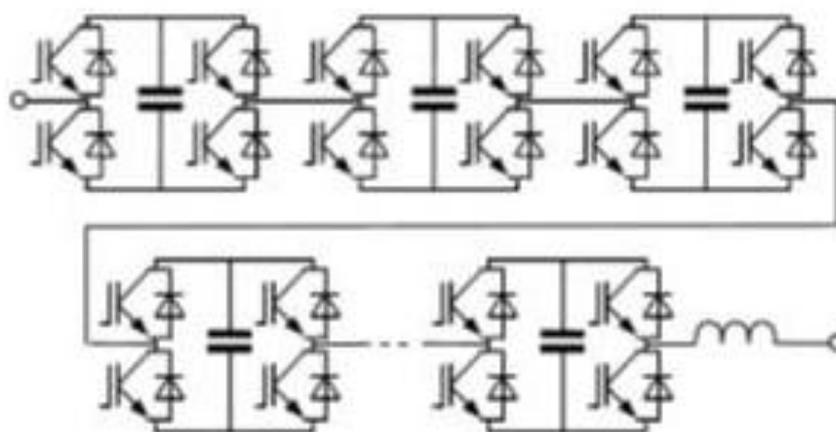


Рисунок 1.19 – Однофазный компенсатор

На сегодняшний день общая мощность установленных статических компенсаторов составляет около 110000 Мвар, из них мощность преобразователей напряжения, применяемых для систем передачи, достигает около 4000 Мвар.

#### Продольная компенсация реактивной мощности

Электростанции по экономическим причинам не строятся близко к нагрузкам, то есть выработанная энергия должна транспортироваться на большие расстояния. На рисунке 1.20 показана зависимость напряжения на конце линии 345 кВ от передаваемой активной мощности для трёх величин длины линии (100, 200 и 300 км). Натуральная мощность этой линии – 410 МВт.

Чем длиннее линия, тем меньше максимальная передаваемая мощность. Электрическая длина линии может быть увеличена при установке последовательных конденсаторов. Этот принцип раньше использовался для компенсации импеданса трансформаторов, чтобы улучшить параметры напряжения при больших изменениях нагрузки, подключенной на стороне низкого напряжения.

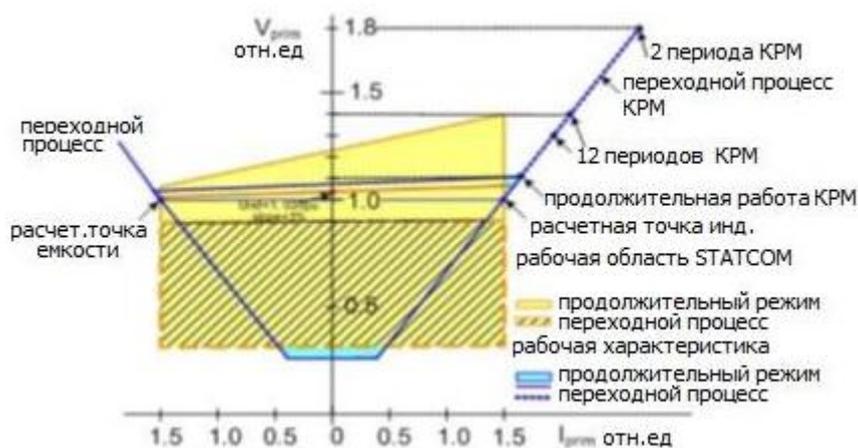


Рисунок 1.20 – Вольт-амперные характеристики КРМ

#### *А. Фиксированные последовательные конденсаторы*

Последовательные конденсаторы могут быть установлены на обоих концах линии или в средней точке. Основное внимание уделяется профилю напряжения вдоль линии при передаче электроэнергии. Степень компенсации обычно не превышает 70% импеданса линии. Фиксированные последовательные конденсаторы могут быть установлены как один основной блок или в субблоках, чтобы обеспечить возможность ступенчатой адаптации степени компенсации для различных условий работы системы.

#### *В. Последовательные конденсаторы с тиристорным управлением*

В некоторых приложениях часть фиксированных последовательных конденсаторов может быть дополнена параллельными реакторами с тиристорным управлением, которые допускают плавное регулирование в пределах определённого диапазона угла управления. На рисунке 1.21 показана установка с такими последовательными конденсаторами с тиристорным управлением и её возможная характеристика управления импедансом.

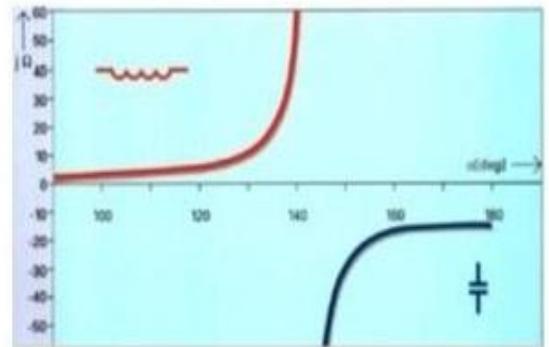


Рисунок 1.21 – Одиночная линия последовательного конденсатора с тиристорным управлением

Последовательные конденсаторы с тиристорным управлением имеют ограниченный рабочий диапазон угла управления от около  $150^\circ$  до  $180^\circ$ . Продолжительность работы в индуктивном диапазоне невозможна из-за слишком больших токов тиристоров. Допустима только работа в режиме полной проводимости реактора, управляемого тиристором.

### *С. Преобразователи напряжения*

Установки СТАТКОМ с преобразователями напряжения, установленные последовательно в линию, формируют унифицированный контроллер потока мощности. В других станциях такие последовательно подключенные конфигурации преобразователей напряжения устанавливаются для целей распределения потоков мощности или нагрузки между параллельными линиями (трансформируемый статический компенсатор). Преимуществом последовательной установки с преобразователем напряжения является возможность управления в индуктивной области.

Динамическая компенсация реактивной мощности с управлением при помощи силовой электроники обеспечивает улучшение работы систем передачи и теперь является признанным средством компенсации реактивной мощности среди других устройств.

Большое разнообразие технологий FACTS обеспечивает надёжные решения для большинства имеющихся и возникающих вновь требований при передаче электроэнергии.

Комбинация динамичной и обычной коммутируемой компенсации реактивной мощности часто приводит к экономичным решениям для работы в установившемся режиме и при переходных процессах в электрической системе. FACTS на основе преобразователей напряжения будут использоваться более широко, особенно в диапазоне малых и средних мощностей.

В ближайшем будущем, вероятно, для преодоления имеющихся ограничений при работе систем передачи потребуется большее количество конденсаторных установок компенсации реактивной мощности, которые рассматриваются как важное средство для повышения стабильности системы и защиты от перебоев энергоснабжения.

## 2. Моделирование полупроводникового компенсатора

### 2.1. Разработка модели компенсатора в MATLAB Simulink

С целью уточнения режимов работы и апробации алгоритмов управления силовой схемой осуществим математическое моделирование работы схемы. Моделирование осуществлялось в программной среде Matlab/Simulink с использованием встроенных математических моделей библиотеки Power System. Поскольку компенсирующие устройства работают на достаточно больших токах и напряжениях, а стоимость электрических элементов их схем достаточно велика, эффективным является исследование режимов их работы с помощью математических и компьютерных моделей перед переходом на реальные испытания.

В качестве инструмента для создания такой модели хорошо подходит программа MATLAB Simulink, потому что она позволяет как моделировать электрические компоненты, так и выполнять арифметические и логические операции, необходимые для описания алгоритма работы системы управления.

Рассмотрим компьютерную модель компенсатора, разработанную в программе MATLAB Simulink. Модель имеет структуру, состоящую из нескольких подсистем: подсистемы моделирования сети, силовой части компенсатора, его системы управления, нагрузки. Общий вид модели представлен на рисунке 2.1, схема сети на рисунке 2.2

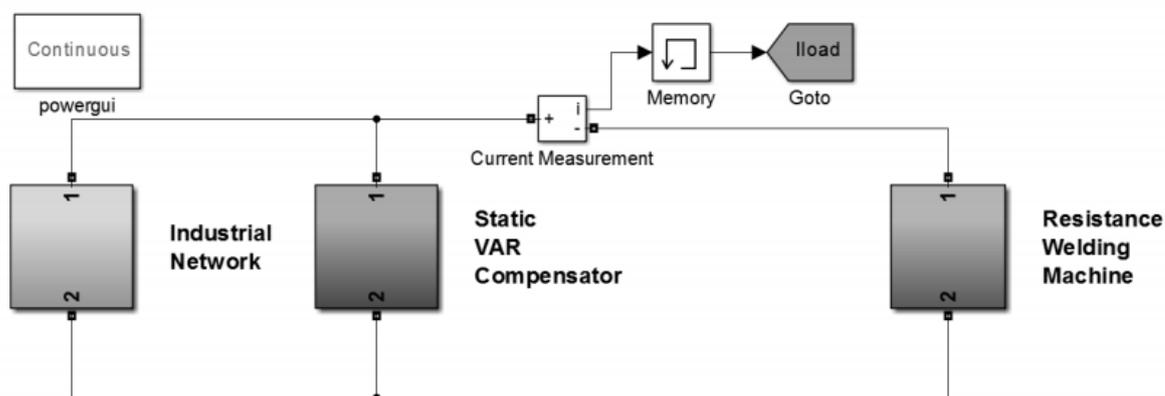


Рисунок 2.1. Общий вид модели системы сеть – компенсатор – нагрузка

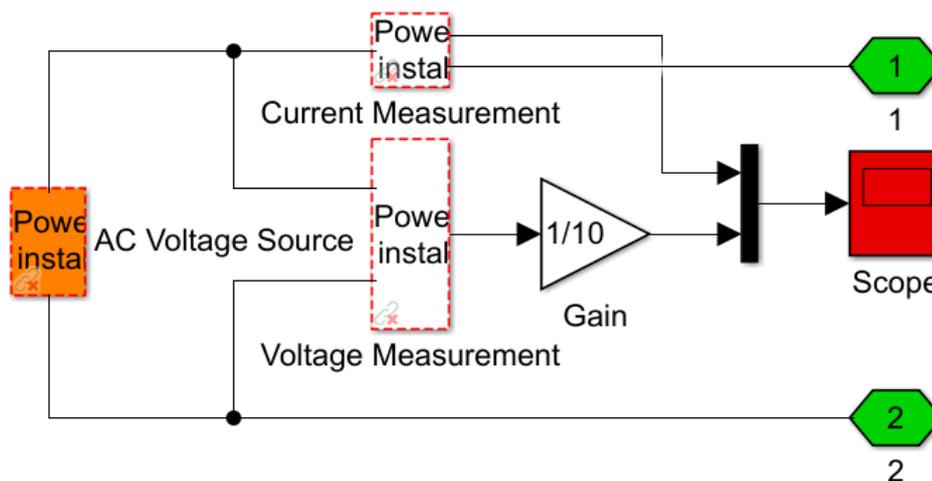


Рисунок 2.2. Система промышленная сеть

Наиболее современными универсальными устройствами, позволяющими значительно повысить качество электрической энергии, представляются статические полупроводниковые компенсаторы неактивных составляющих полной мощности. На рисунке 2.3 показана силовая часть компенсатора.

Преимущества IGBT транзисторов: имеют высокую плотность тока, практически отсутствуют потери статического и динамического типа. Отсутствие управляющего тока позволяет не прибегать к использованию гальванически изолированных схем для работы и управления с применением дискретных элементов и предоставляет возможность создания интегральных схем – драйверов. Стойки к воздействию короткого замыкания. Имеют относительную простоту параллельного соединения.

Постоянно совершенствующиеся технологии позволяют улучшить качественные характеристики транзисторов. Созданы элементы, рассчитанные на большую величину напряжения, выше 3 кВ и большие значения тока до нескольких сотен ампер.

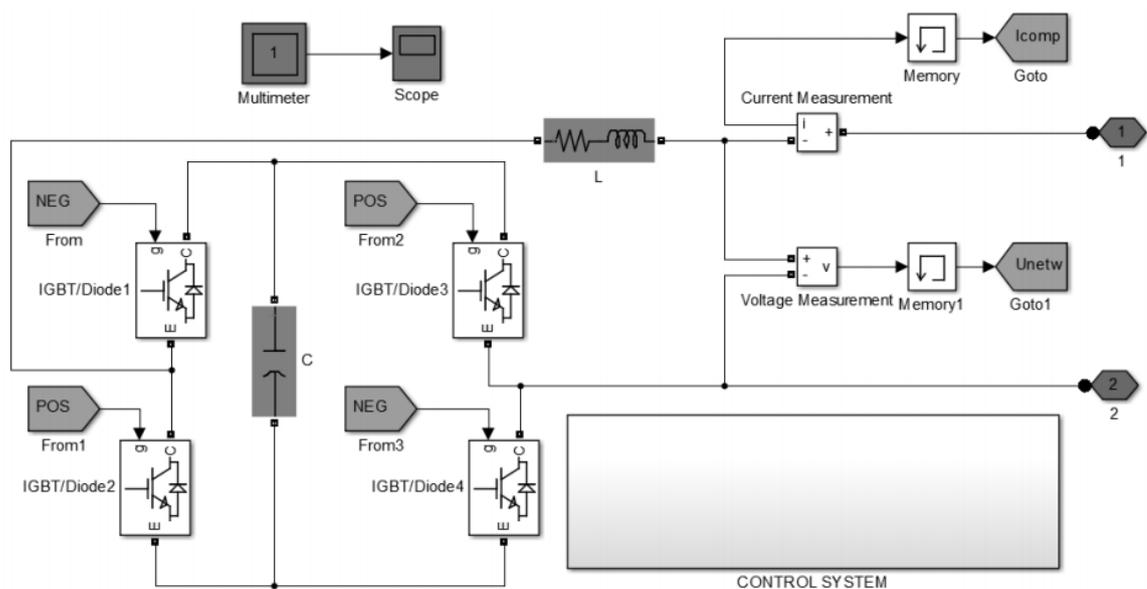


Рисунок 2.3. Схема полупроводникового компенсатора

Характерная черта для этого транзистора – очень малое значение управляющей мощности, использованной для коммутационных операций существенных токовых значений силовых цепей. В этой же подсистеме расположены датчики тока компенсатора и напряжения сети, а также блок мультиметра и осциллографа для отображения токов и напряжений на всех электрических элементах силовой части. Вложенной подсистемой является система управления (CONTROL SYSTEM), задача которой рассчитать по заданному алгоритму управляющие воздействия ( NEG и POS) на ключи компенсатора, используя значения тока нагрузки  $I_{load}$ , тока компенсатора  $I_{comp}$ , напряжения сети  $U_{netw}$ . Подход, когда силовая часть устройства моделируется на уровне электрических компонентов, а система управления на уровне математических и логических операций, описывающих алгоритм ее работы, может быть применен для различных типов полупроводниковых преобразователей в целом, например, описанных в [13–15].

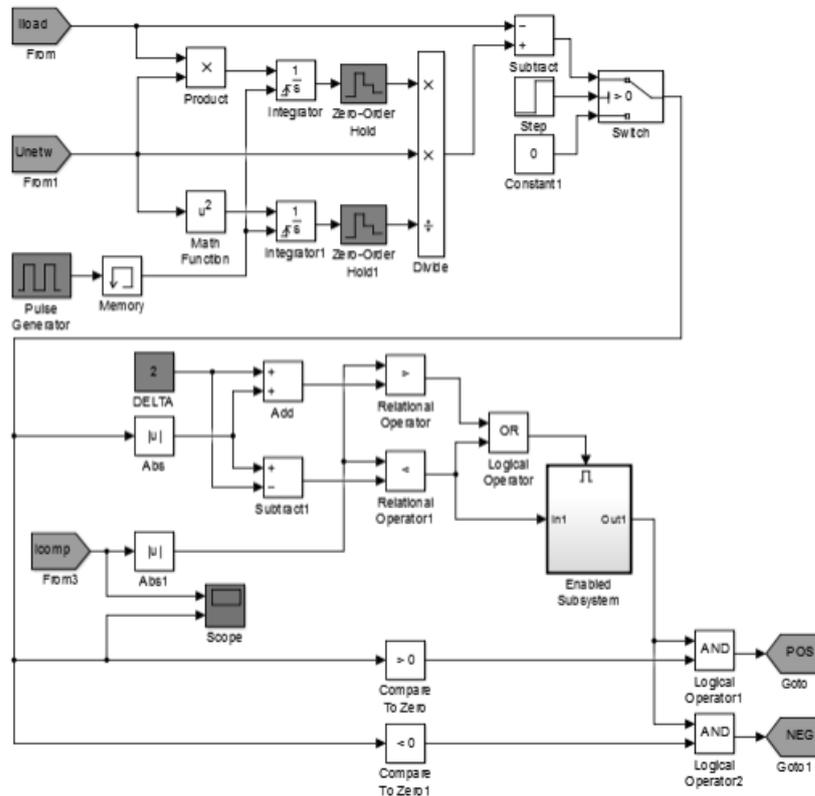


Рисунок 2.4. Система управления статического полупроводникового компенсатора

Вычисление мгновенных значений компенсационного тока  $i_C(t)$  происходит по формуле:

$$i_C(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \cdot u(t) - i(t),$$

где  $u(t)$  – мгновенные значения сетевого напряжения ( $U_{netw}$ );

$i(t)$  – мгновенные значения тока нагрузки ( $I_{load}$ );

$T$  – период сетевого напряжения.

Интегрирование реализовано соответствующими блоками `Integrator` и `Integrator_1`. Поскольку ток текущего периода вычисляется по значениям определенных интегралов предыдущего периода, применяются блоки

удержания значений интегралов в течение следующего периода Zero – Order Hold.

Результат интегрирования вначале поступает на вход Zero-Order Hold, затем накопленная сумма в блоке интегрирования сбрасывается сигналом от генератора. Разделение этих двух процессов во времени обеспечивает блок Memory. Переключатель Switch обеспечивает отсутствие неверных значений компенсационного тока в течение самого первого периода работы модели.

Когда дело доходит до обнаружения неисправности в устройстве наиболее важной функцией является сравнение фактических токов в транзисторах контролируемых ветвей с токами, имитированными в системе управления. Моделирование основано на измеренное напряжение и фактическое напряжение на транзисторах. В случае расхождения между этими двумя значениями устройство считается неисправным. В случае обнаружения неисправности системы управления операция будет автоматически переведена в резервную систему, в случае, если такая система отсутствует, компенсатор будет отключен.

С ключами компенсатора обычно используют силовой трансформатор между сетью питания и компенсатором. На этих шинах гармонических фильтров тиристорные управляемые реакторы и конденсаторы связаны. Во многих случаях к этой шине также подключается вспомогательный силовой трансформатор. Это важно, что силовой трансформатор является единственным подключением этой шины к сети. Никогда не более одного силового трансформатора в цепи.

Трансформаторы компенсаторов, как и генераторные трансформаторы, выполнены с большими коэффициентами поворота. Напряжение на шине трансформатора компенсатора обычно находится в диапазоне 15-30 кВ независимо от уровня напряжения сети. Достаточно нормальный коэффициент трансформатора составляет 400/25 кВ. Это большое соотношение приводит к очень высокому короткому замыканию токов на шине трансформатора, он

часто находится в диапазоне 50-90 кА (среднеквадратичный). Ток Трансформатора также становится большим из-за большой мощности и низкого напряжения, 5-15 кА являются нормальными значениями. При проектировании защиты следует учитывать большие токи нагрузки системы.

Единый контроллер потока мощности (UPFC), показанный на 3.48 состоит из двух переключающих преобразователей, работающих от общего канала постоянного тока, обеспечиваемый конденсатором постоянного тока. Один соединен последовательно с линией, а другой параллельно [28], [32]. Эта схема функционирует как идеальный силовой преобразователь, в котором активная мощность может свободно протекать в любом направлении между концами двух инверторов переменного тока и каждый инвертор может независимо генерировать (или поглощать) реактивную мощность на своем собственном выходном проходе переменного тока. Преобразователь с помощью последовательного трансформатора регулирует напряжение переменного тока с регулируемой величиной и фазовым углом последовательно с линией передачи. Шунтирующий преобразователь генерирует или поглощает реальную мощность, требуемую конвертером через общую связь постоянного тока. Инвертор, соединенный последовательно, обеспечивают основную функцию контроллера путем приложения переменного напряжения с контролируемой величиной амплитуды и фазового угла на частоте мощности, последовательно через трансформатор.

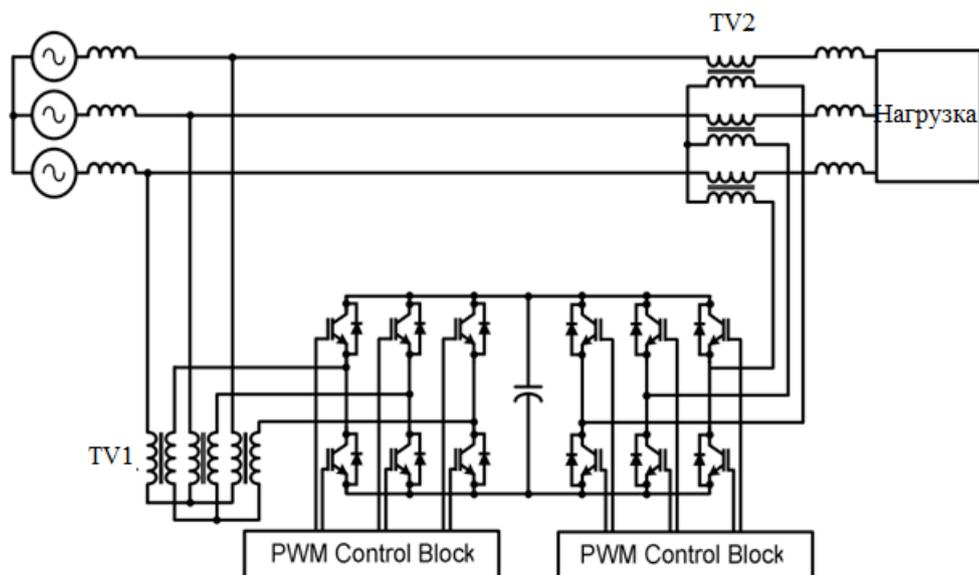


Рисунок 2.5. Схема силовой цепи контроллера управления компенсатором

Пропускной ток линии передачи последовательный источнику напряжения, приводит к активному и реактивному обмену энергией между ним и системой переменного тока. Активная мощность, потребляемая на входе переменного тока, то есть вход трансформатора связи преобразуется инвертором в мощность постоянного тока, которая появляется на линии постоянного тока как положительная или отрицательная команда на реальную мощность. Реактивная мощность обмениваемая на входе переменного тока, генерируется внутри инвертора.

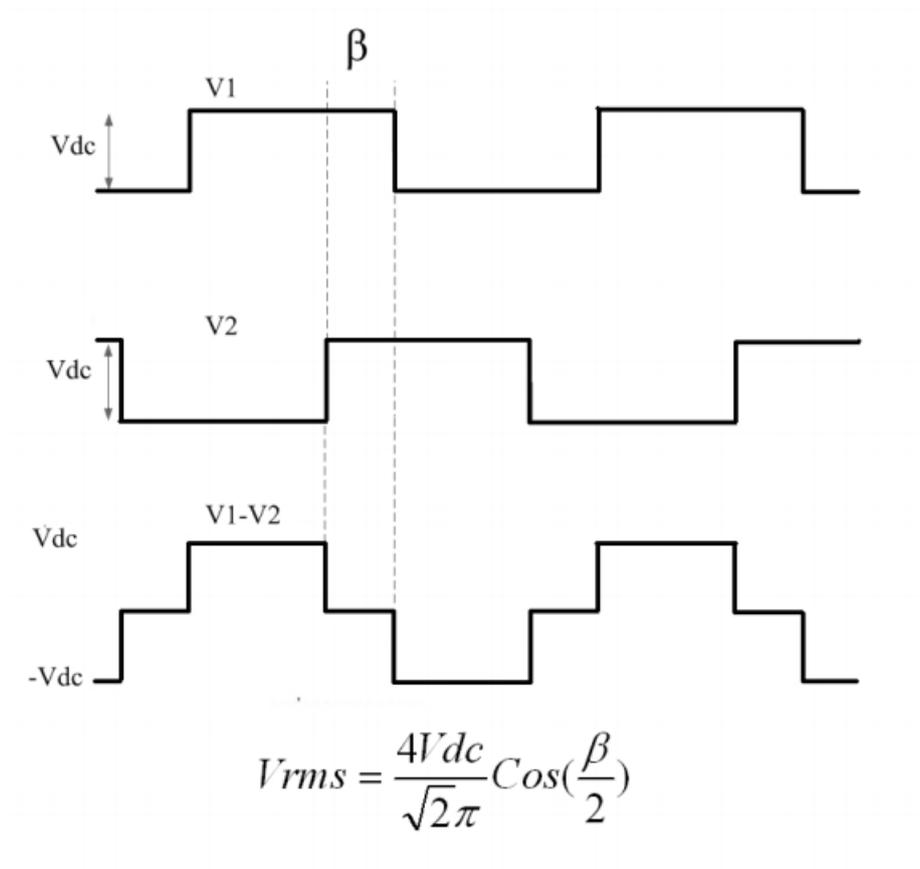


Рисунок 2.6 Управление напряжением мостового преобразователя.

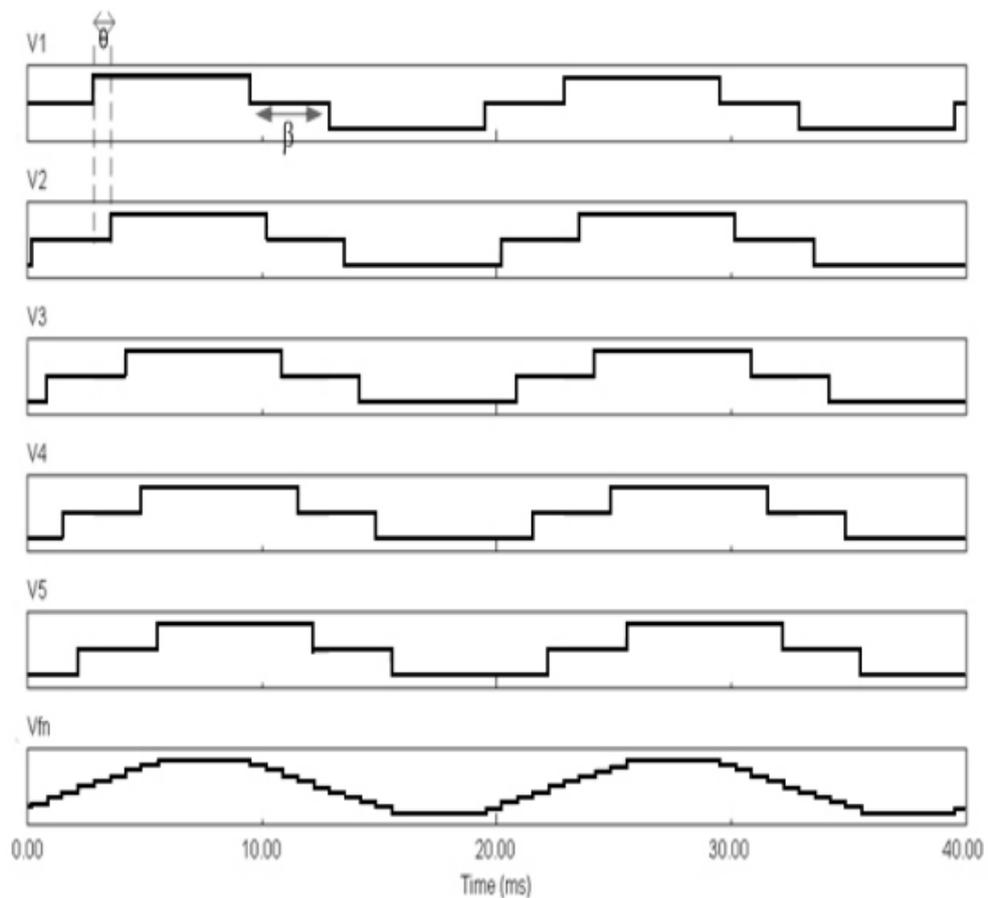


Рисунок 2.7. Выходное напряжение статического полупроводникового компенсатора

Все однофазные инверторы и трансформаторы идентичны и поэтому можно рассматривать как один модуль. Большой электролитический конденсатор подключен параллельно цепи постоянного тока. IGCT или IGBT ключи могут использоваться как коммутационные устройства. На практике небольшой фильтр LCL обычно подсоединяют на стороне переменного тока для уменьшения высших гармоник.

Каждый однофазный мостовой инвертор работает в квазиквадратичном режиме, как показано на рисунке 2.6. Среднеквадратичное значение выходного напряжения контролируется изменяя угол  $\beta$ . Можно видеть, что выходное напряжение изменяется линейно на косинус  $\beta / 2$ . Вместо контроля  $\beta$ , лучше контролировать косинусы, чтобы уменьшить гармоники низшего порядка, разность фаз между инверторами должно быть выбрано надлежащим

образом. Для  $N$  однофазных инверторов в каждой фазе разность фаз равна  $60 / N$ .

На рисунке 2.7 показывается смоделированное выходное напряжение предлагаемой системы. На основе выходных напряжений инвертора на рисунке 2.7, инвертор может рассматриваться как идеальный источник напряжения. Если величина напряжения инвертора больше, чем напряжение в сети, тогда статический полупроводниковый компенсатор генерирует отстающий реактивный ток, то есть действует, как конденсатор. С другой стороны, если величина напряжения инвертора ниже напряжения в сети, тогда статический компенсатор генерирует опережающий реактивный ток, то есть действует, как реактор.

## 2.2. Симуляция работы компенсатора на семейства нагрузок

Таким образом, представленная компьютерная модель очень удобна тем, что в ней можно назначать времена включения и отключения того или иного блока, тем самым проверяя работу компенсатора в различных режимах. Имеется возможность произвольно менять все параметры компьютерной модели.

Параметры модели компенсатора подбирались исходя из электромагнитной совместимости с реальной промышленной сетью и из возможности физической реализации (ограничение несущей частоты и т. д.). Реактивные сопротивления компонентов компенсатора рассчитываются исходя из требуемых значений пульсаций токов и напряжений и длительности протекания переходных процессов, а активные сопротивления минимизируются.

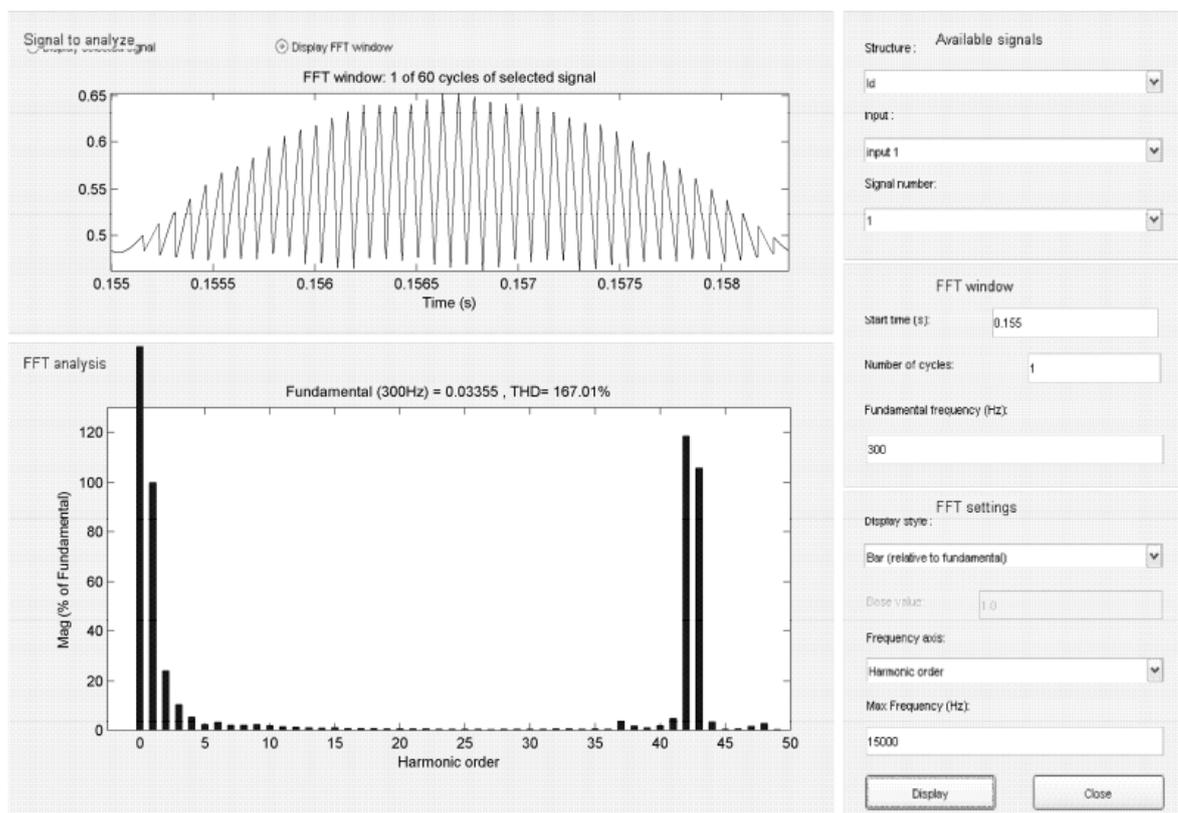


Рисунок 2.5. Анализ Фурье (FFT) динамики тока дросселя

Для проведения Анализа Фурье необходимо предусмотреть вывод исследуемых сигналов в рабочую область MATLAB. Для этого можно настро-

ить осциллограф Scope. Расчитываем модель, после этого как необходимо открыть окно блока Powergui и нажать кнопку FFT Analysis - быстрое преобразование Фурье. После этого откроется окно Powergui FFT Tools, в котором необходимо нажать кнопку Display для отображения результатов. Настройка процедуры гармонического анализа выполняется с помощью параметров задаваемых в окне Powergui FFT Tools.

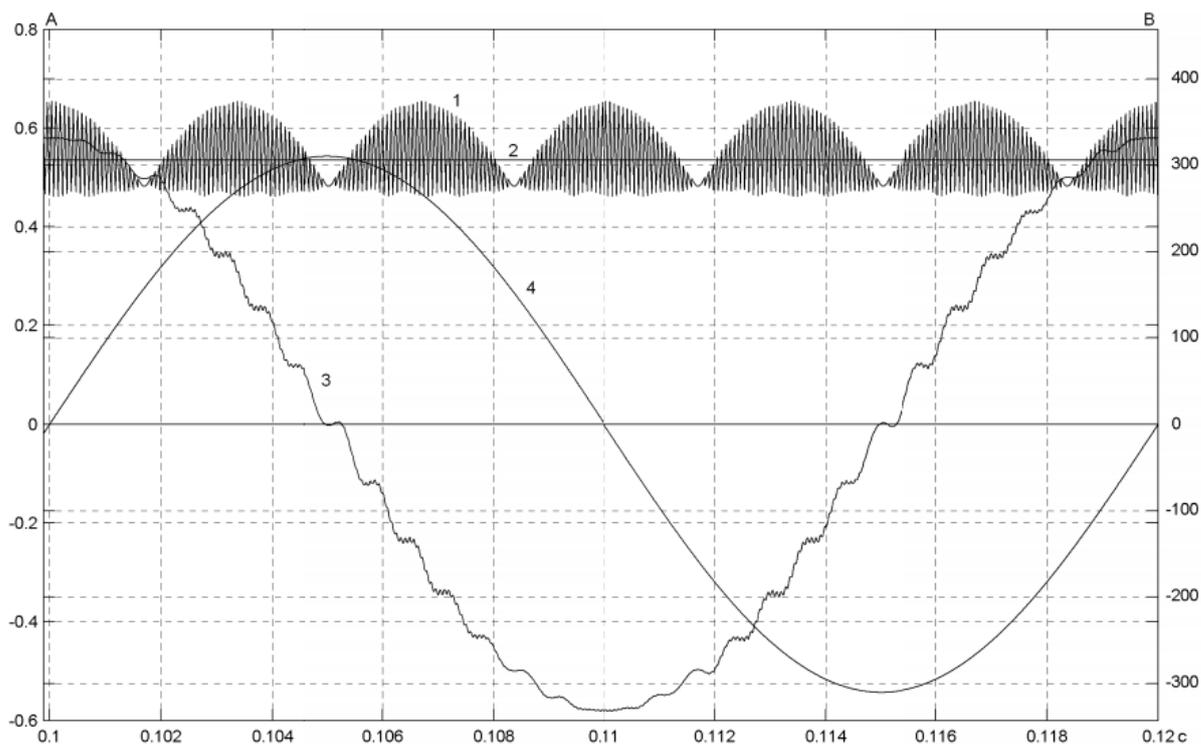


Рисунок 2.6. Диаграммы токов и напряжений: 1– ток дросселя, 2– среднее значение тока дросселя, 3– ток фазы, 4 – напряжение фазы

Компьютерное моделирование подтвердило работоспособность предложенной модели компенсатора неактивной мощности и адекватность разработанного алгоритма управления им, а также показало, что компенсатор обладает следующими характеристиками: 1) высоким энергетическим показателем (КПД > 95%), мощность фильтра в условиях реальной сети составляет < 1% от мощности компенсатора; 2) высоким быстродействием – длительность переходного процесса при любом изменении реактивной мощности составляет менее 0,005 с (1/4 периода колебания се-

тевого напряжения); 3) возможностью непрерывного (бесступенчатого) регулирования реактивной мощности в широком диапазоне.

Таким образом, выводы следующие:

1. Иммитационное моделирование в программе Matlab Simulink подтвердило возможность компенсации неактивных составляющих полной мощности с помощью полупроводникового компенсатора с емкостным накопителем энергии.

2. Регулирование генерируемой мощности может осуществляться бесступенчато в пределах от 25 до 105% от номинальной мощности компенсирующего устройства и по времени при любом изменении нагрузки не превышает 5 мс.

3. Компенсатор имеет высокие энергетические показатели, коэффициент полезного действия составляет не менее 95%, мощность фильтра составляет около 1% от номинальной мощности компенсатора.

4. Анализ Фурье показал, что процентное содержание высших гармоник в токе дросселя не превышает 10% от постоянной составляющей.

5. Компенсатор неактивной мощности на базе инвертора и емкостного накопителя энергии является достойной альтернативой регулируемым конденсаторным батареям.

### 3. Влияние параметров компенсатора на качество компенсации различных нагрузок.

#### 3.1 Построение зависимостей номиналов элементов компенсатора от параметров нагрузки

На рисунках 3.1, 3.2 приведены результаты моделирования в виде временных диаграмм. Параметры нагрузки: коэффициент мощности  $\cos(\varphi) = 0,7$ , мощность  $P = 20$  кВт. В первый период компенсатор не работает, потребляемый из сети ток достигает 130 А, во второй период компенсатор функционирует верно, ток сети уже не превышает 50 А и является почти чисто активным. Максимальная частота переключения транзисторов в этом режиме не превышает 20 кГц. Емкость накопительного конденсатора составляет 500 мкФ. Индуктивность токоограничивающего дросселя компенсатора равна 3 мГн.

Временные диаграммы этой же модели, но с индуктивностью токоограничивающего дросселя 10 мГн показаны на рисунке 3.2.

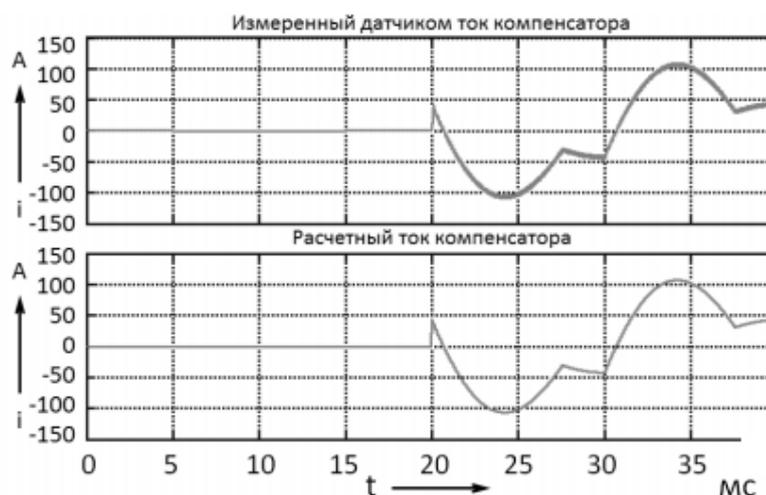


Рисунок 3.1. Временные диаграммы токов компенсатора

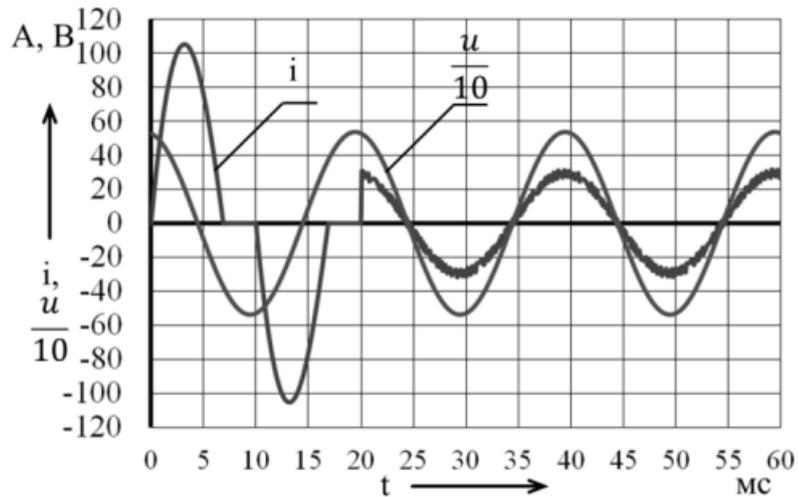


Рисунок 3.2. Сетевое напряжение и сетевой ток при нормальном функционировании компенсирующего устройства.

На рисунке 3.3 приведены временные диаграммы при коротком замыкании в нагрузке. С нулевого момента времени до  $t=20$  мс устройство отключено. В момент времени  $t=20$  мс компенсатор включается и устраняет отрицательное влияние энергопотребителя на сеть. Затем в  $t=35$  мс происходит авария – выводы нагрузки соединяются через низкоомный резистор номиналом  $0,1$  Ом. Это моделирует режим короткого замыкания и приводит к резкому возрастанию потребляемого тока. Видно, что вследствие нормальной реакции системы управления на аварию как на рабочий режим ток компенсирующего устройства повышается примерно в 2 раза. Одновременно на графике тока нагрузки видно, что компенсатор не защищает ее от короткого замыкания и не заменяет собой традиционные средства защиты. Поэтому для защиты компенсатора от короткого замыкания в нагрузке достаточно традиционных средств защиты энергопотребителя со стороны питающей сети, например, автоматического выключателя, отключающего нагрузку, поскольку в момент аварии ток компенсатора не возрастает скачком до момента срабатывания выключателя.

Статический полупроводниковый компенсатор является устройством FACTS (гибкая система передачи переменного тока). С помощью тиристор-

ного управления реактивной мощностью он обеспечивает динамическое управление напряжением. Быстрая реакция компенсатора делает его очень подходящим для выполнения таких задач как стабилизация динамического напряжения, что означает увеличение возможностей передачи мощности, снижение колебаний напряжения в промышленных дуговых печах. СТК являются особыми в том смысле, что они необходимы больше всего во время сетевых помех. В этих случаях они могут обеспечить успешную продолжительную работу во время проблем сети. чтобы обеспечить высокую безопасность следует минимизировать количество реле и использовать защитные средства в устройстве компенсации.

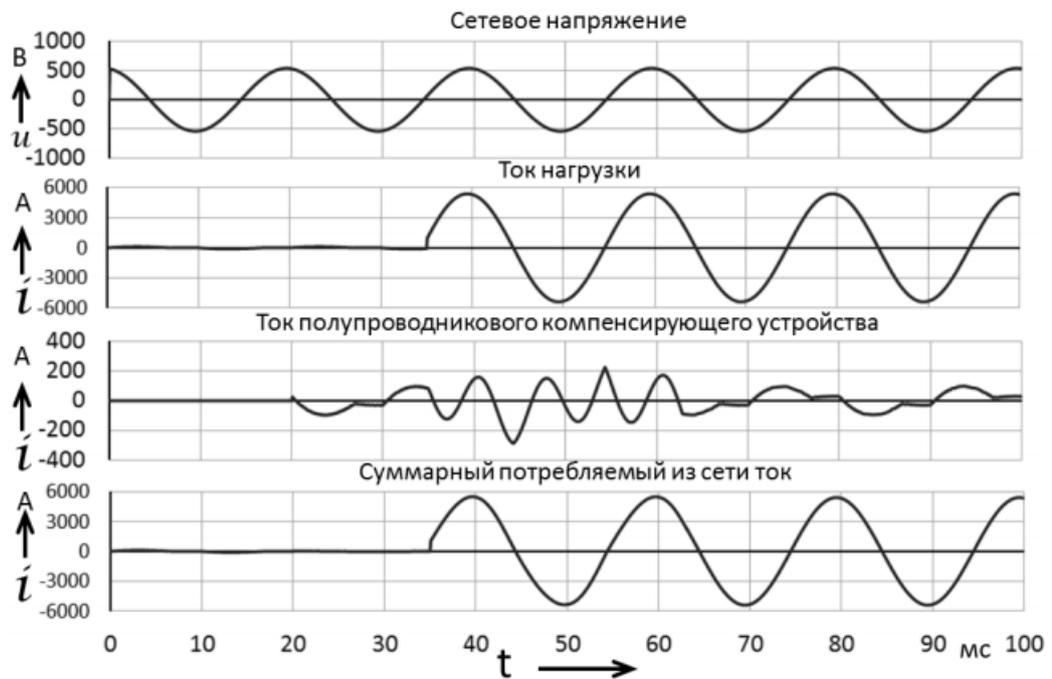


Рисунок 3.3. Временные диаграммы работы компенсатора при коротком замыкании в нагрузке.

В процессе моделирования происходит короткое замыкание в одном из транзисторов инвертора (VT3), при этом наблюдается повышение тока через  $L_k$ . Ток компенсатора, протекающий через дроссель, измеряется датчиком во многих способах управления компенсатором, например, в следящем (гистерезисном) способе.

На рисунке 3.4 представлены временные диаграммы работы компенсатора при холостом ходе ключа инвертора напряжения (IGBT/Diode3).

В этом случае достаточно системе управления отключать все ключи или все компенсирующее устройство при длительном отсутствии реакции на управляющие импульсы.

Тем не менее, в своем составе с одной стороны компенсатор должен иметь традиционные защитные средства в виде различных предохранителей и автоматических выключателей.

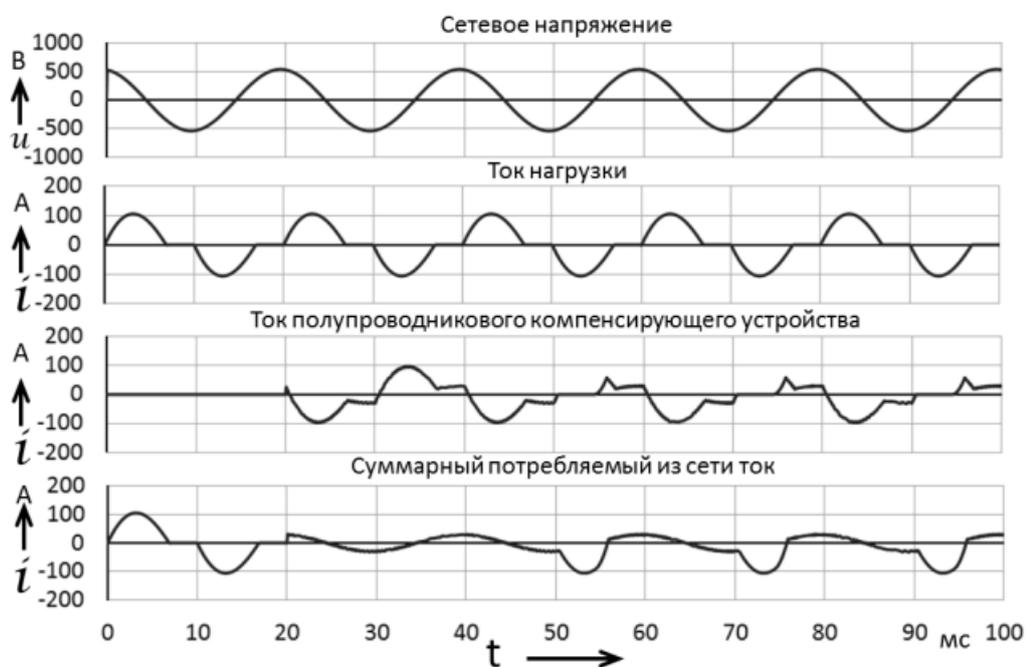


Рисунок 3.4. Временные диаграммы работы компенсатора при холостом ходе ключа инвертора напряжения.

### 3.2. Аналитическое описание выявленных зависимостей

Слабая сетка в сочетании с тяжелыми нагрузками, гармонические выбросы и сложные кабельные сети вызывают проблемы с качеством электричества. В то же время использование возможностей гармонической фильтрации полупроводниковых компенсаторов многие из этих проблем могут решить.

На рисунке 3.5 представлена работа системы промышленная сеть – нагрузка установки до компенсации.

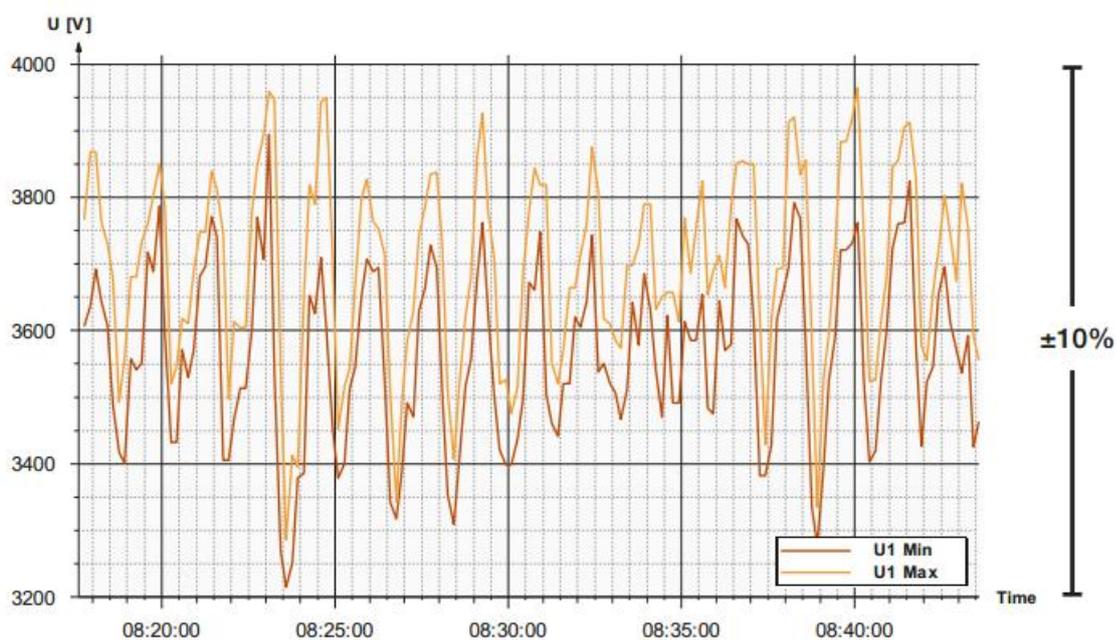


Рисунок 3.5 - Диаграмма напряжения системы сеть – нагрузка до компенсации

После установки полупроводникового компенсатора неактивных составляющих мощности диаграмма напряжения стала выглядеть, как показано на рисунке 3.6.

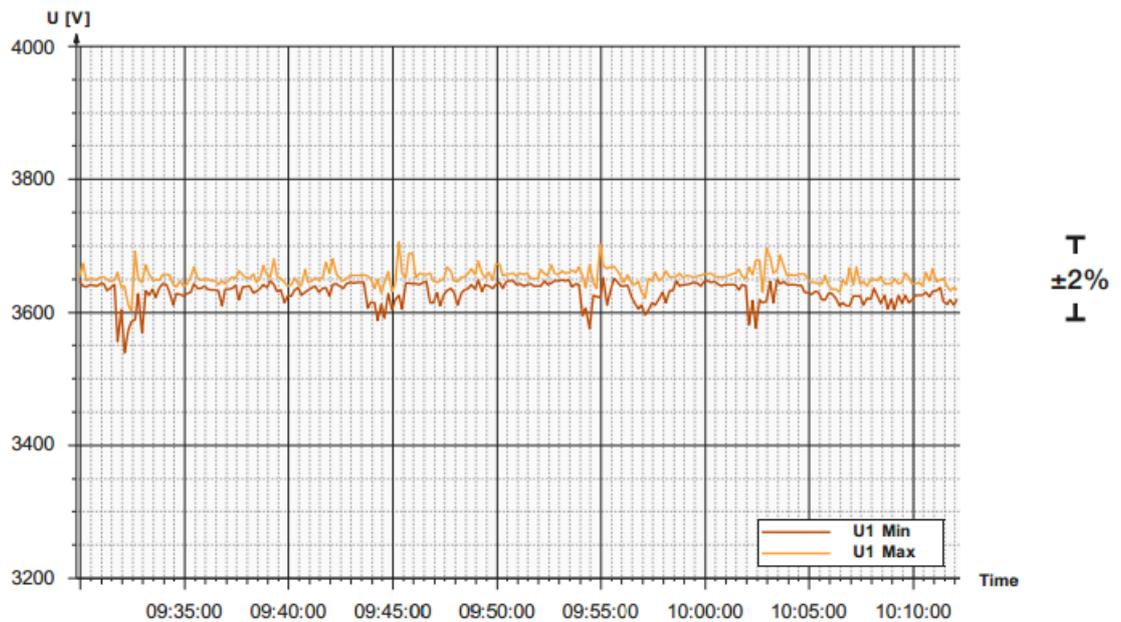


Рисунок 3.6 - Диаграмма напряжения системы сеть – компенсатор – нагрузка.

Как можно увидеть из графиков динамическое поведение нагрузок вызывает сильные колебания напряжения без компенсации. При установке полупроводникового компенсатора колебания напряжения уменьшаются с десяти до двух процентов.

В ходе работы мы установили, что при подключении полупроводникового компенсатора можно:

- сохранить постоянное значение коэффициента мощности и напряжения
- уменьшить гармоники в системе
- смягчить переходные процессы, такие как пусковые токи и провалы и резкие возрастания напряжения
- сбалансировать разрегулированную систему (контроль отрицательной фазовой последовательности)
- снизить тарифы на электроэнергию.

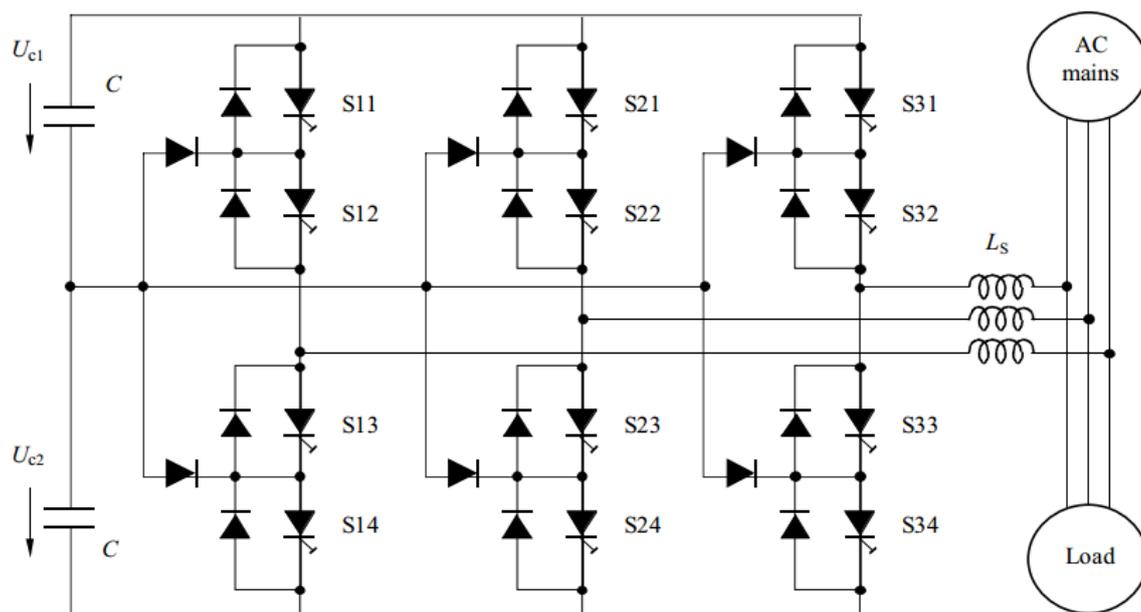


Рисунок 3.7 - Силовая схема полупроводникового компенсатора

Статический компенсатор, который показан на рисунке 3.7 использует трехуровневый преобразователь типа источника напряжения. Основная схема состоит из мостового преобразователя из двенадцати мощных IGBT транзисторов с изолированным затвором с антипараллельными диодами, которые соединены с трехфазным питанием через реактор  $X_s$  небольшой величины. Два конденсатора подключены к преобразователю постоянного тока.

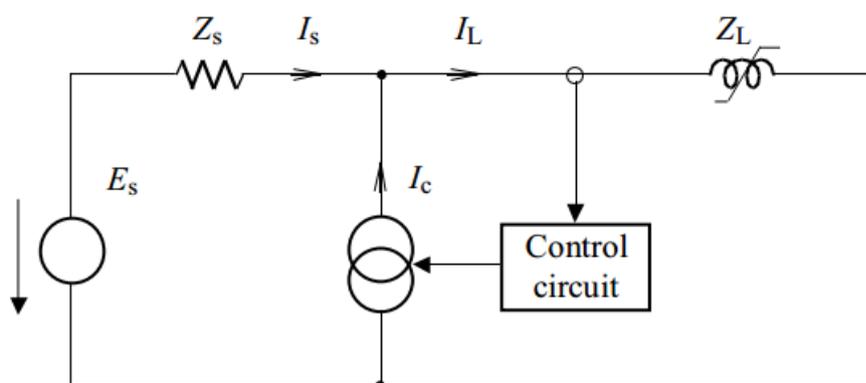


Рисунок 3.8 - Эквивалентная схема активного фильтра

Принципы работы системы может быть объяснен путем рассмотрения принципиальной эквивалентной схемы системы полупроводникового ком-

пенсатор. На рисунке 3.8 показана эквивалентная схема активного фильтра мощности.

$$i_s = i_L + i_c .$$

где  $I_s$  – линейный ток,  $I_L$  – ток нагрузки,  $I_C$  – компенсационный ток

Моделирование системы осуществляется в рамках следующих предположений:

- 1) все переключатели идеальны,
- 2) напряжение источника сбалансировано,
- 3) Общие потери в инверторе сосредоточены в резисторе  $R_s$ ,
- 4) Колебание гармоник, вызванное переключением, незначительно.

Чтобы проверить справедливость модели, описанной выше, был проведен ряд имитационных тестов для анализа системы в устойчивом состоянии и при переходных условиях. Использовался пакет MATLAB. Это, безусловно, приведет к разработке надежного контроллера.

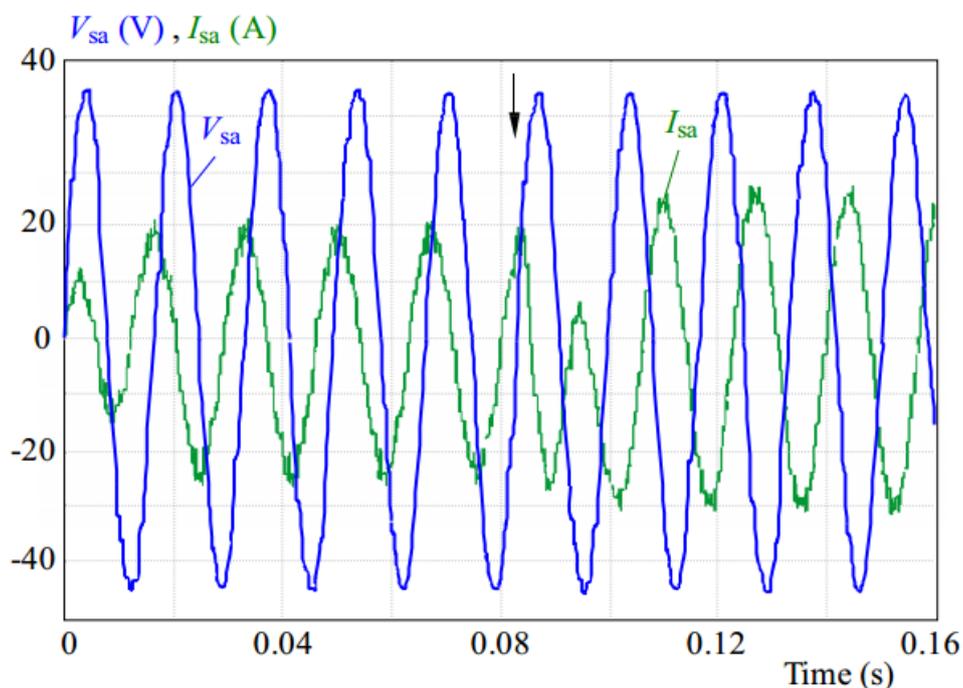


Рисунок 3.9 - Диаграмма значений токов гармоник

Амплитуда эталонного сигнала была отрегулирована так, чтобы вызвать

колебания в режиме сдвига фаз. На рисунке 3.9 показан имитируемый ток и напряжение при изменении осциллограмм от 20 кВАр до -20 кВАр. Отмечаем увеличение амплитуды гармоник в текущем режиме по отношению к режиму запаздывания.

На рисунке 3.10 показано переходное напряжение на двух конденсаторах после внезапного изменения направления. Заметны пульсации напряжений  $U_{c1}$  и  $U_{c2}$ . На рисунке 3.11 представлен график мощности.

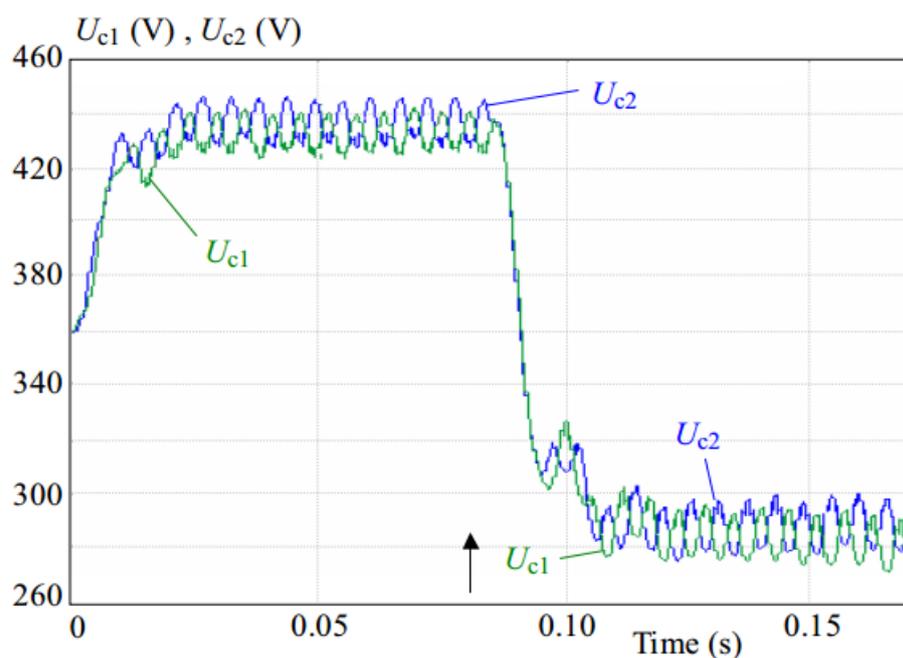


Рисунок 3.10 - Напряжения инвертора

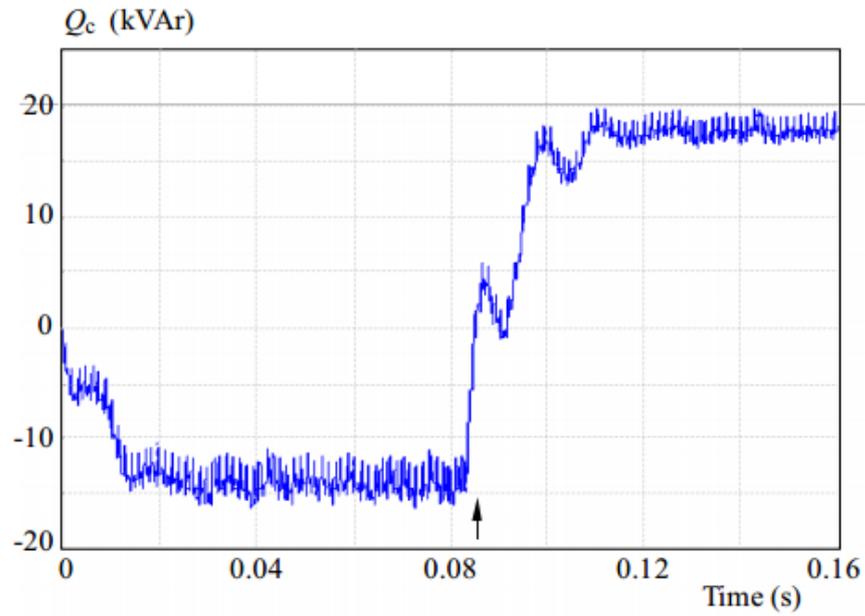


Рисунок 3.11 Диаграмма реактивной мощности

На рисунках 3.12, 3.13 показаны смоделированные переходные процессы реактивной мощности при резком изменении напряжения.

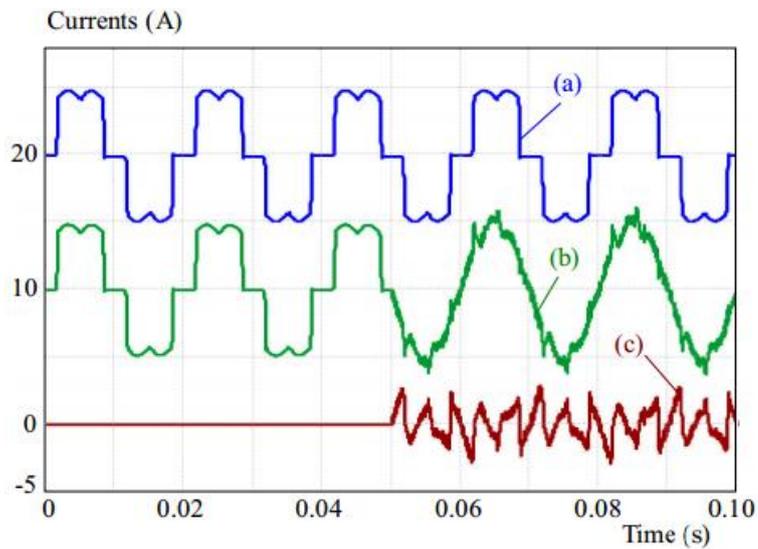


Рисунок 3.12 Диаграмма токов: а – ток нагрузки, б – ток источника, с – ток активного фильтра

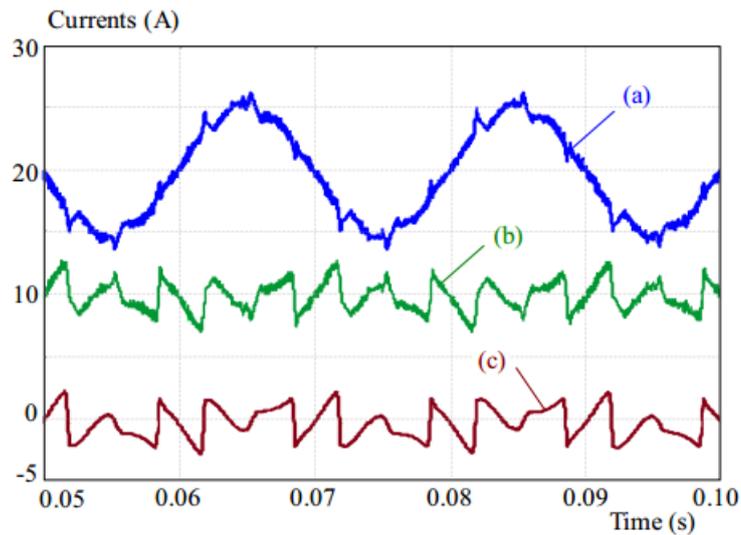


Рисунок 3.13. Диаграмма токов: а – линейный ток, б – ток фильтра переменного тока, с – ток опорного фильтра.

Производство энергии с использованием возобновляемых природных ресурсов, таких как ветер, солнечный свет, дождь, приливы, геотермальное тепло занимает умы человечества уже много лет, поскольку это эффективное средство сокращения выбросов парниковых газов (ПГ). Потребность в инновационных технологиях для более эффективного использования электричества стала основной тенденцией, поскольку наблюдается увеличение спроса на электроэнергию. Во всем мире, во многих странах становится все труднее идти в ногу со спросом на электроэнергию. Кроме того, разрабатываются электромобили (от велосипедов до автомобилей) и продаются с всё возрастающим успехом во многих странах по всему миру.

Значительное падение напряжения происходит на нагрузке линий передачи переменного тока. Величина падения этого напряжения увеличивается с длиной линии, а также с нагрузкой на приемник. Такое падение напряжения нельзя допускать в сетях переменного тока. Это связано с тем, что многие электрические устройства, такие как двигатели, реле и осветительное оборудование работают только в условиях стабильного напряжения (напряжение, для которого строго рассчитано).

Одним из способов компенсировать падение напряжения, происходящее через передачу переменного тока является добавление подстанции, содержащей шунтирующие конденсаторы вдоль линии. Добавление шунтирующих конденсаторов, таким образом, создают эффект деления переменного тока на многие сегменты меньшей длины. Каждая подстанция служит для компенсации потерь напряжения на линии передачи переменного тока (то есть поддержания постоянного напряжения на каждом сегменте линия передачи переменного тока).

На рисунке 3.14 показана типичная линия передачи переменного тока, используемая для передачи больших количеств электрической энергии на большом расстоянии от электростанции до распределительной сети (которая, в свою очередь, распределяет электроэнергию на потребители).

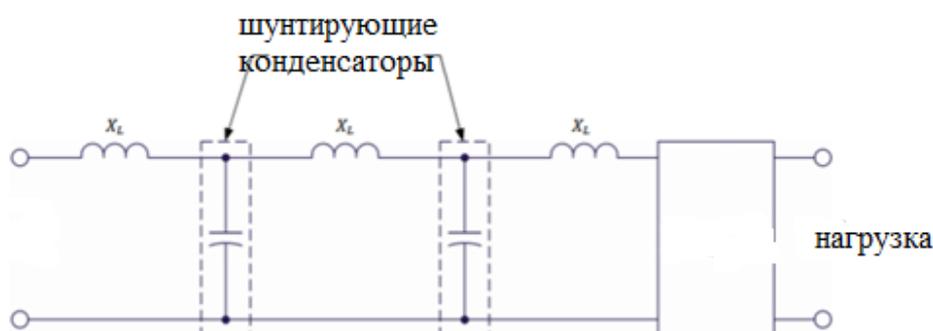


Рисунок 3.14 - Типичная линия передачи переменного тока, используемая для передачи больших объемов электроэнергии на расстоянии от электростанции до распределительной сети.

Как показано на рисунке 3.20, линия передачи переменного тока делится на три сегмента равной длины двумя шунтирующими конденсаторными подстанциями, используемыми для компенсации напряжения.

Напряжение на каждой подстанции компенсируется переключением шунтирующих конденсаторов. И для поддержания напряжения вдоль линии передачи переменного тока как можно ближе к номинальному значению напряжения сети переменного тока. Шунтирующие конденсаторные подстанции имеют определенные недостатки, такие как сложность координации

всех подстанций и неидеальная компенсация напряжения на каждом участке линии передачи переменного тока. Однако, поскольку шунтирующие конденсаторные подстанции расположены вдоль линий переменного тока, и, таким образом, напрямую не доставляют электроэнергию потребителям, не требуется, чтобы напряжение на подстанциях шунтирующего конденсатора было идеально скомпенсировано в любое время.

С другой стороны, напряжение в конце третьего сегмента (то есть на нагрузке) линии передачи переменного тока на рисунке 3.20 компенсируется с помощью статического компенсатора реактивной мощности вместо подстанции с шунтирующим конденсатором. Это связано с основным преимуществом, которое имеют статические компенсаторы над шунтирующими конденсаторными подстанциями – наиболее быстрая компенсация напряжения на линии. Поскольку нагрузка расположена в конце линии передачи переменного тока, важно чтобы напряжение на этой станции было как можно лучше скомпенсировано до нагрузки; Следовательно, используется статический компенсатор вместо шунтирующего конденсатора.

Благодаря быстрой и точной компенсации напряжения на конце приемника переменного тока, СТАТКОМ способен компенсировать пульсации напряжения, происходящие по линии (генерируемые переключением шунтирующих конденсаторов), и компенсировать колебания напряжения, вызванные изменением параметров нагрузки (т. е. спрос на электроэнергию потребителей).

Чтобы получить уровень точности компенсации напряжения, сравнимый со СТАТКОМ при использовании подстанции шунтирующего конденсатора на нагрузке необходимо установить на подстанцию шунтирующего конденсатора большое количество конденсаторов с различными значениями емкости. Подстанция шунтирующего конденсатора представляет собой большое количество возможных шунтирующих конденсаторов и их комбинаций, следовательно, позволит шунтирующим конденсаторам точно скомпенсировать напряжение на нагрузке. Однако такая подстанция с шунтирующим конден-

сатором получится столь же дорогостоящей, как и СТАТКОМ подстанции (если не более дорогой), тогда как время работы ее будет намного медленнее, чем время работы статического компенсатора.

Распространены два типа тиристорных компенсаторов: управляемый тиристорами реактор и управляемые тиристорами конденсаторы. Тиристорные компенсаторы является эффективным средством для выравнивания колебаний напряжения при быстро изменяющейся нагрузке. Плата за это достаточно высокая цена, но несмотря на это, тиристорные компенсаторы реактивной мощности единственное экономически выгодное решение для удаленных от подстанции предприятий, где сеть достаточно слабая.

Как видно из названия статические тиристорные компенсаторы состоят из конденсаторов и ключей, которые поглощает реактивную мощность от сети переменного тока, подключенной к СТАТКОМ.

На рисунке 3.15 показана упрощенная однофазная схема СТАТКОМ с тиристорным управлением.



Рисунок 3.15 - Упрощенная однофазная схема СТАТКОМ с тиристорным управлением

Обратите внимание, что в некоторых случаях СТАТКОМ с тиристорным управлением может также содержать реактор, в основном в качестве гармонических фильтров.

Как видно из описания тиристоры могут включаться или переключаться только вне системы. Из-за этого количество реактивной мощности, подаваемой компенсатором, может регулироваться только пошагово путем изменения количества тиристоров, которые включены в в то же время. Чем выше количество включенных тиристоров, тем выше количество реактивной мощности, подаваемой компенсатором. С другой стороны реактор может быть отрегулирован по необходимости из полностью проводящего состояния (угол открытия тиристора  $90^\circ$ ) в непроводящее состояние (угол открытия тиристора  $180^\circ$ ), что позволяет точно и непрерывно регулировать количество реактивной мощности, которой компенсатор обменивается с системой переменного тока, к которой он подключен. Основное значение напряжения, тока и реактивной мощности, связанных с одной фазой компенсатора типа с тиристорным управлением показан на электрической схеме на рисунке 3.21. Обратите внимание, что для упрощения схемы, используется только один TSC для представления всех объектов.

Генератор поглощает реактивную мощность при возбуждении и вырабатывает реактивную мощность при передаче. Реактивная мощность на выходе непрерывно контролируется путем изменения тока возбуждения. Допустимое поглощение реактивной мощности или ее производство зависит от активной выходной мощности. Для коротких операций обычно допускается переопределить термические ограничения. Время отклика при управлении напряжением от нескольких десятых доли секунды и выше. Обычно номинальный коэффициент мощности генераторов находится в диапазоне от 0,80 до 0,95. Генераторы, установленные удаленно от центров загрузки, обычно имеют высокий коэффициент мощности; Это часто происходит с большими гидротурбинными генераторами. Статический компенсатор является одним из устройств силовой электроники, известный как FACTS (гибкие

системы передачи переменного тока) контроллер, которые могут управлять одним или больше параметров в энергосистеме.

Устройства FACTS – это полупроводниковые приборы на тиристорах или транзисторах, чьи две основные задачи: увеличение пропускной способности и управления потоком мощности. Таким образом, контроллеры FACTS можно разделить на четыре категории: серийные контроллеры, шунтирующие контроллеры, комбинированные серийные контроллеры, комбинированные контроллеры серийно-шунтированные. Статический компенсатор попадает в категорию «Шунт-контроллеры», и он функционирует как быстрый генератор или в качестве быстрого поглотителя реактивной мощности с целью поддержания или контроля конкретных параметров (обычно напряжение шины).

Компенсатор состоит из тиристорного управляемого реактора (TCR) и блока фиксированных конденсаторов (FC). Реактор с тиристорным управлением, индуктор, реактивное сопротивление которого изменялось непрерывно путем частичного контроля проводимости тиристорного клапана. Основными элементами TCR являются реактор и двунаправленный тиристор, включенный, как показано на рисунке 3.16 в система, показанной на рисунке 3.17.

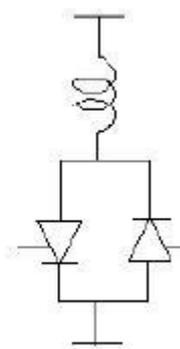


Рисунок 3.16 - Реактор, управляемый тиристорами

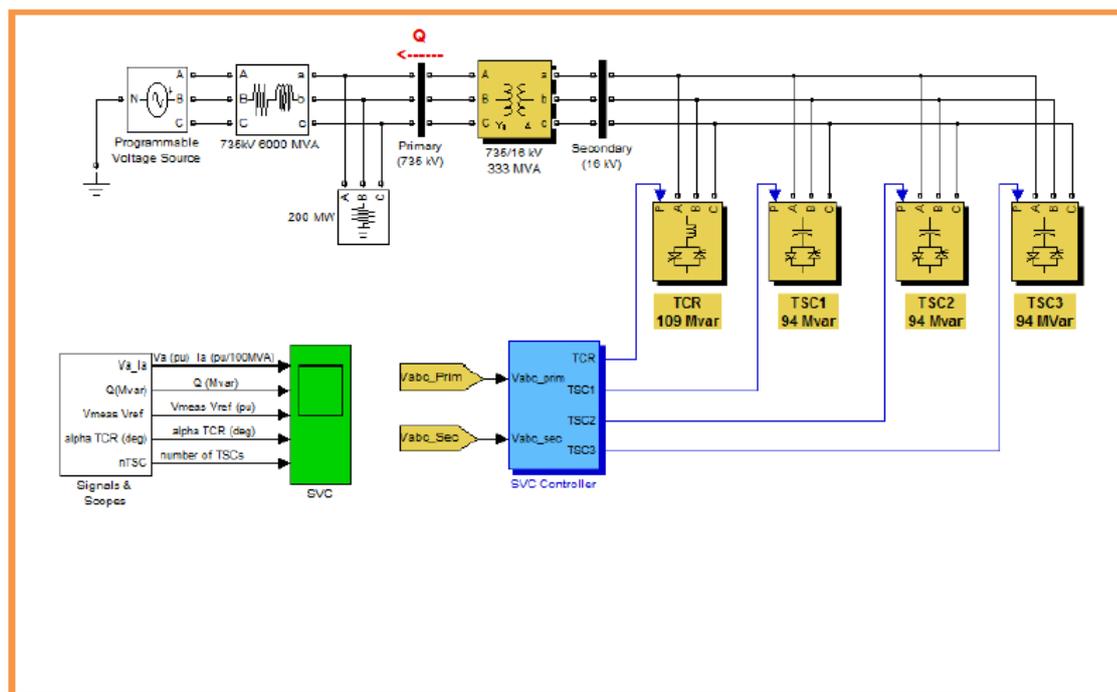


Рисунок 3.17 - Модель исследуемой электросистемы

Скорость реакции: Реактор контролируется углом открытия  $\alpha$  который колеблется между  $90^\circ$  и  $180^\circ$ . Его скорость реакции достаточно быстра в устройствах, вызванных быстро флуктуирующими нагрузками. С другой стороны, в энергосистеме важно, чтобы контроль за реактором был стабильным и точным.

Независимый контроль фаз: трехфазный реактор, используемый в компенсаторе, может независимо контролировать трехфазное напряжение энергосистемы, чтобы он мог уравновесить любую несимметричную трехфазную нагрузку. При дисбалансе условий, реактор может генерировать больше гармоник, чем при сбалансированных условиях. По этой причине, как правило, необходимо размещенный пассивный фильтр LC, используя для этого такую же компенсацию конденсаторов. В этом случае введение реактивной мощности компенсатора обусловлено фильтрами и фиксированными конденсаторами.

Реакция на перенапряжение и пониженное напряжение: это одна из наиболее важных характеристик компенсатора, потому что реактор компенсирует напряжение, в условиях очень высокого или очень

низкого напряжения, приложенного к шине, где размещен компенсатор. В этом случае компенсатор добавляет реактивную мощность, необходимую для восстановления нормальной величины напряжения.

Блок фиксированных конденсаторов (FC) сам по себе является частью емкостной переменной, требуемой системой, а другая часть – пассивные фильтры. Фильтры размещаются параллельно с конденсаторами и они настроены на большую гармоническую частоту. Фиксированные конденсаторы (FC), И реактор с тиристорным управлением может быть рассмотрен По существу, состоящий из переменного реактора (управляемого углом открывания  $\alpha$ ) и фиксированные конденсаторы с общим требованием компенсатора.

Можно промоделировать для четырех случаев состояния сети:

- Сеть без компенсатора со стандартной нагрузкой.
- Сеть без устройств компенсации с повышенной нагрузкой.
- Сеть с интеграцией компенсатора.

Моделирование может быть проведено для следующих непредвиденных обстоятельств:

- а. Увеличение нагрузки для увеличения потока мощности через основную систему передачи.
- б. Трехфазная ошибка на шине после увеличения нагрузки.

Это отключение может привести к ухудшению производственного неравенства и поэтому необходимо ускорить появление неконтролируемой ситуации в сеть. Добавление генераторов в электрическую сеть подействует на стабильность напряжения, как представлено на рисунке 3.18, 3.19. Можно видеть, что полупроводниковый компенсатор может улучшить статическую и динамическую стабильность энергосистемы.

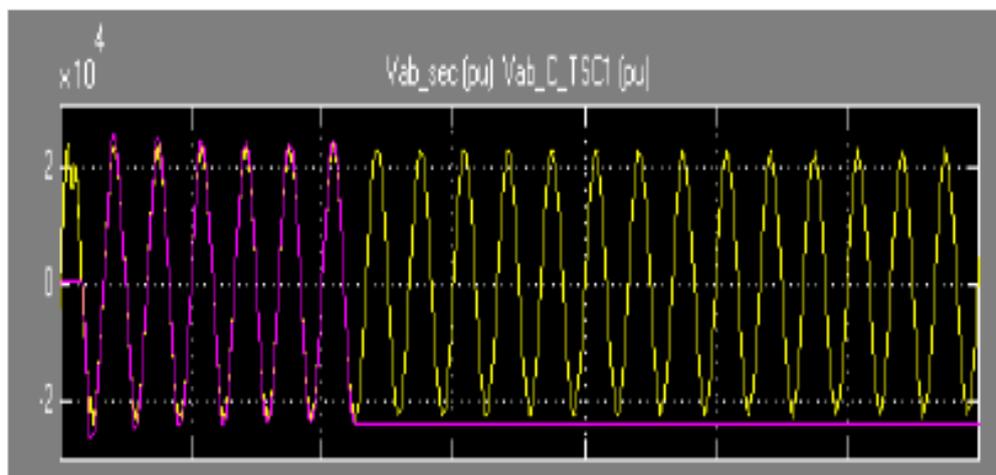


Рисунок 3.18 - Уровни напряжения на системных шинах для трехфазной неисправности без устройств компенсации

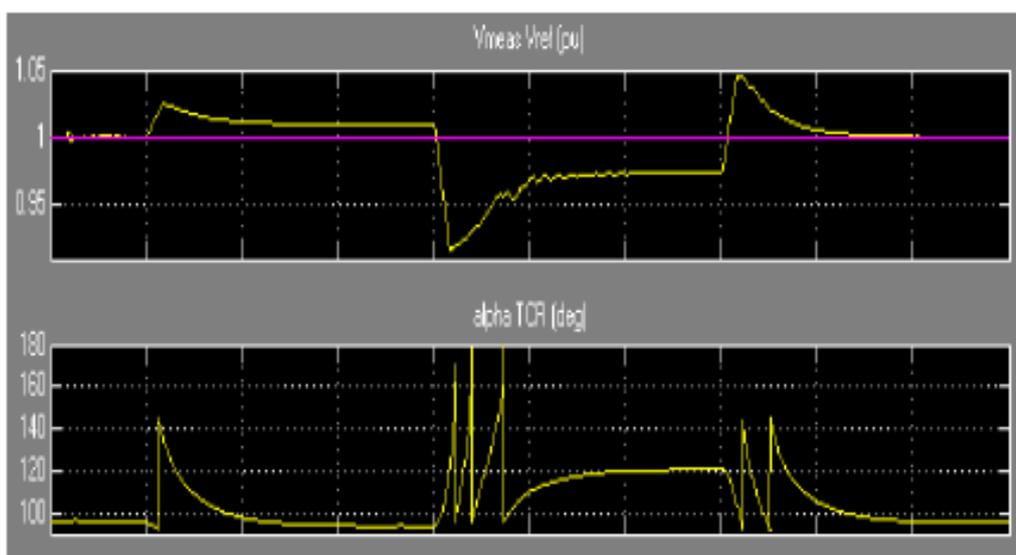


Рисунок 3.19 - Уровни напряжения на компенсаторе

В современное время устройства силовых электронных устройств в энергосистемах значительно развиты. Необходимо контролировать поток энергии на линии передачи данных на большие расстояния. Новые устройства вводятся в передачу силовой системы для снижения потерь в линии передачи, а также для увеличения пропускной способности. СТАТКОМ является контроллером на базе транзисторов IGBT для регулирования напряжения путем изменения реактивной мощности в длинной линии передачи.

В каждой части местоположения протекание мощности протестировано с использованием компенсации и без компенсации. В работе представлен подход к математическому моделированию и система управления. Модель стандартной системы преобразователя разработана и протестирована с использованием среды MATLAB Simulink.

СТАТКОМ состоит из соединительного трансформатора, инвертора и конденсатора постоянного тока, показанного на рисунке 3.20.

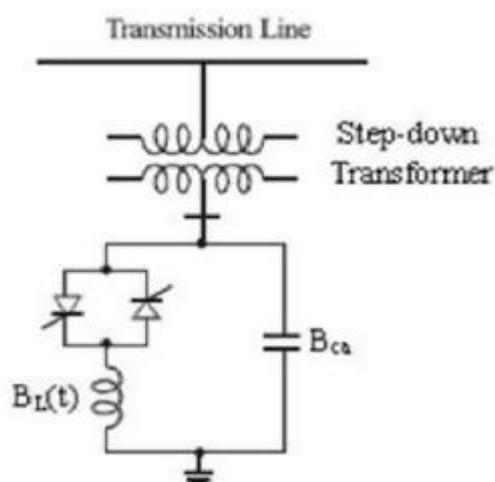


Рисунок 3.20. - Структура СТАТКОМ.

Для такой компоновки в идеальном стационарном анализе можно предположить, что обменом активной энергией между системой переменного тока и СТАТКОМ можно пренебречь, и между ними может быть обменена только реактивная мощность. СТАТКОМ обычно используется для управления напряжением передачи посредством шунта компенсации реактивной мощности. Предполагается, что гармониками, генерируемыми СТАТКОМ, пренебрегают, а также СТАТКОМ сбалансирован на три фазы. Тогда СТАТКОМ может быть эквивалентно представлен управляемым источником напряжения  $U_{sh}$  постоянной положительной частоты. В принципе, выходное напряжение СТАТКОМ можно регулировать так, чтобы реактивная мощность могла быть изменена.

Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ), ранее называемый статическим синхронным конденсатором (СТАТКОМ), во многом по-

хож на вращающуюся машину, используемую для компенсации реактивной мощности. СТАТКОМ основан на твердотельном синхронном источнике напряжения, который аналогичен идеальной синхронной машине, которая генерирует сбалансированный набор из трех синусоидальных напряжений на основной частоте с быстро управляемой амплитудой и фазовым углом. Реальный ток СТАТКОМ пренебрежимо мал и считается нулевым. Контроль реактивного тока  $i_Q(t)$ . Положительное значение означает, что СТАТКОМ находится в индуктивной области, а отрицательное значение означает, что оно находится в емкостной области. Контролируя реактивный ток СТАТКОМ, восприимчивость СТАТКОМ изменяется в соответствии со следующим соотношением. Контроллеры FACTS, подключенные к шунту, такие как SVC и STATCOM, традиционно используются для компенсации реактивной мощности. Размеры этих контроллеров определяются из установившихся требований, то есть, сколько требуется реактивной мощности ( $Q$ ). Предположим, что в установившемся состоянии количество  $Q$ , необходимое для силовой системы, равно нулю. Ниже приводится новый метод анализа эффективности SVC и STATCOM с одинаковой оценкой квар, то есть  $Q = 0,2$

На рисунках 3.21 и 3.22, 3.23 демонстрируются графики активной мощности трех этапов линии передачи, когда полупроводниковый компенсатор подключен в начале, середине и конце нагрузки.

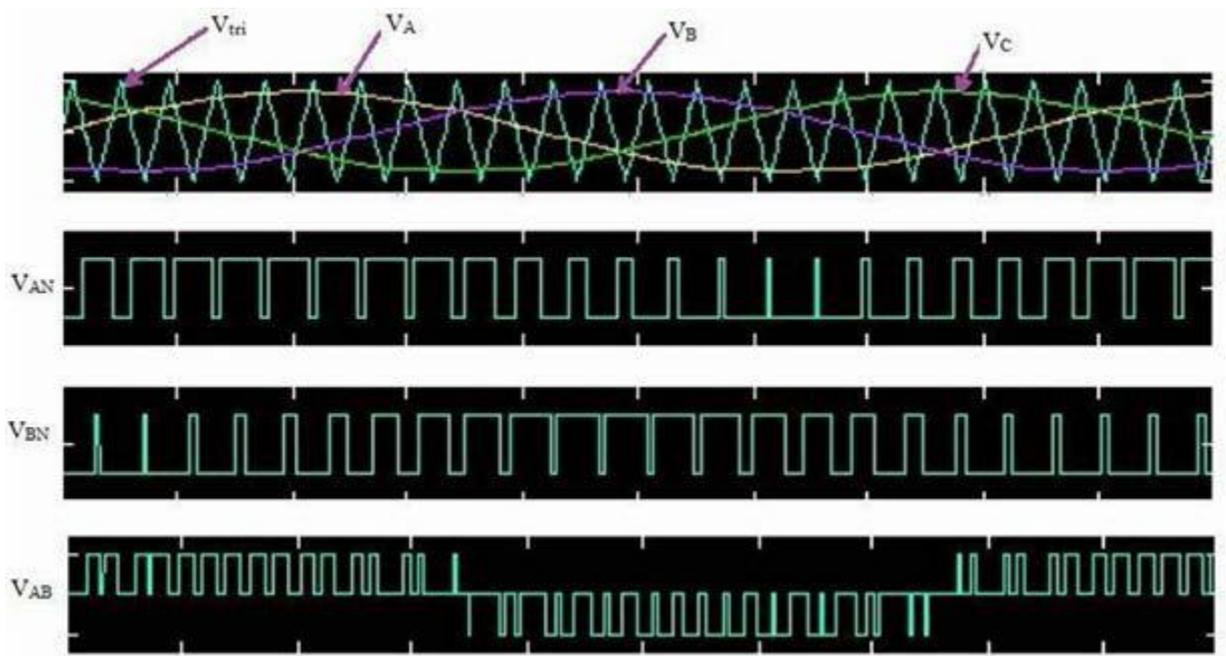


Рисунок 3.21. Диаграмма полной мощности без компенсации

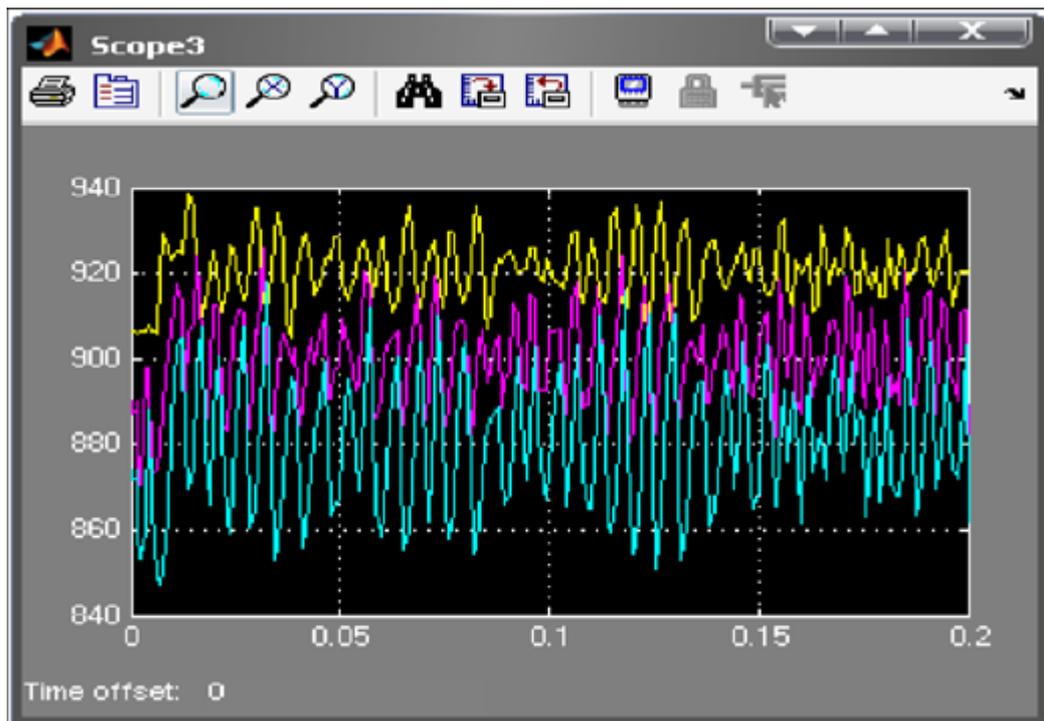


Рисунок 3.22. Реактивная мощность без компенсации

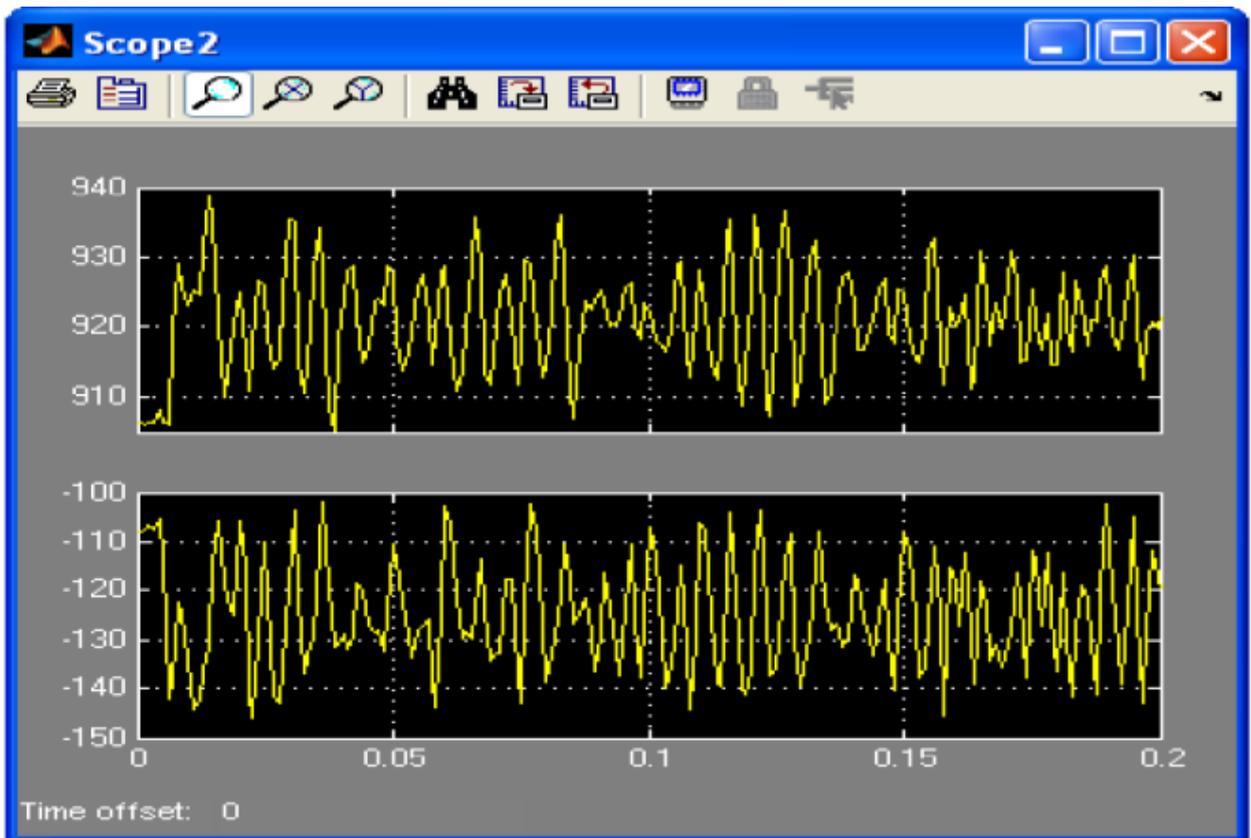


Рисунок 3.23 - Реальная мощность в начале работы полупроводникового компенсатора

Важнейшая роль шунтирующих устройств, которые подключены к линиям связи, заключается в улучшении возможности передачи мощности, а также управления потоком мощности в сети энергосистемы. В этой предлагаемой работе СТАТКОМ используется в качестве шунтирующего устройства FACTS. СТАТКОМ подключается в разных местах, таких как конец, среднего и принимающего части линии передачи. Результаты были получены с компенсацией и без компенсации. Результаты моделирования показывают, что генерируемая реактивная мощность лучше в середине линии передачи по сравнению с другими концами линии передачи, а также напряжение контролируется в середине линии. Таким образом, местоположение СТАТКОМ является оптимальным при подключении к середине линии.. Результаты моделирования были получены в среде MATLAB Simulink.

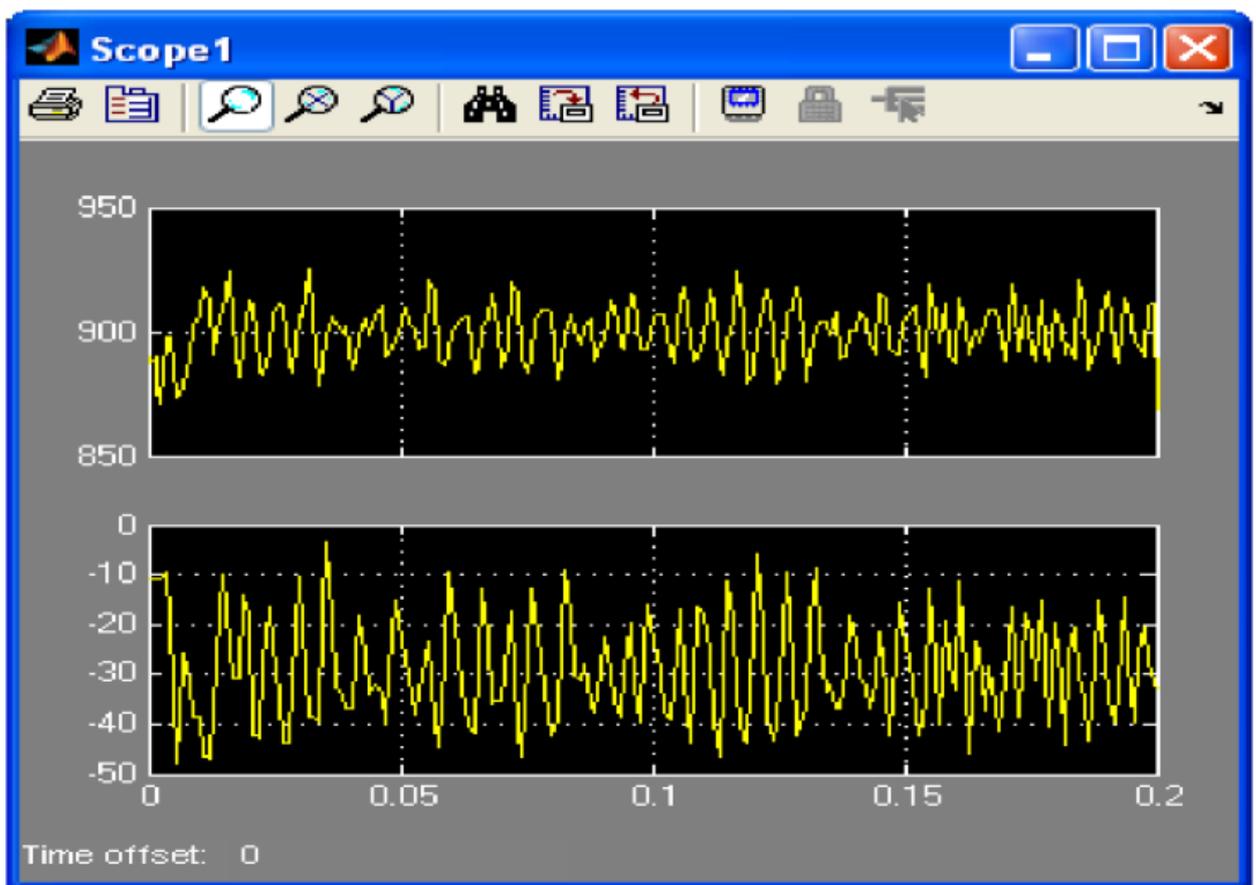


Рисунок 3.24. Мощность когда компенсатор в среднем режиме

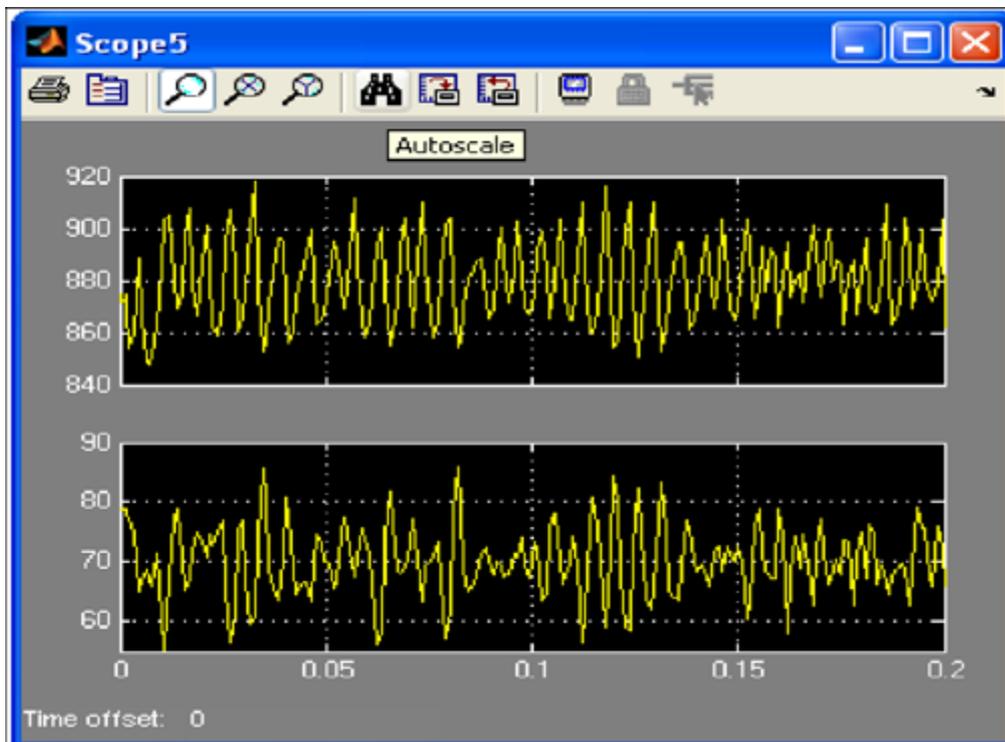


Рисунок 3.25. Мощность при работе компенсатора в конце

Компенсация реактивной мощности статическими полупроводниковыми компенсаторами определяется управлением системой для повышения

производительности. Концепция компенсации охватывает широкую и разнообразную область проблемы как системы, так и заказчика, особенно связанные с проблемами качества электроэнергии, поскольку большинство проблем с качеством электроэнергии могут быть снижены или решены с адекватным контролем реактивной мощности [1]. В общем случае проблема компенсации реактивной мощности рассматривается с двух сторон: компенсация нагрузки и напряжения. При компенсации нагрузки цель заключается в увеличении значения коэффициента мощности системы, сбалансировать активную мощность, потребляемую от источника переменного тока, скомпенсировать напряжения и устранить высшую гармонику тока, пульсации, создаваемые большими нелинейными промышленными нагрузками. Поддержка напряжения обычно требуется для уменьшения колебаний напряжения на терминале линии передачи. Компенсация реактивной мощности в системе передачи также улучшает стабильность путем увеличения максимальной активной мощности, которая может передаваться. Это также помогает поддерживать практически плоскую структуру напряжения на всех уровнях передачи энергии. Компенсатор улучшает высокое напряжение постоянного тока, производительность конверсионного терминала, увеличивает эффективность передачи, контролирует стационарные и временные перенапряжения и могут избежать катастрофических отключений сети.

Последовательные конденсаторы и статические компенсаторы используются для изменения естественных электрических характеристик переменного тока системы. Серийная компенсация изменяет передачу или параметры системы распределения, в то время как шунт компенсации изменяет эквивалентный импеданс нагрузки. В обоих случаях, реактивную мощность, которая протекает через систему можно эффективно контролировать, улучшая производительность всей системы электропитания переменного тока.

Традиционно вращающиеся синхронные конденсаторы и конденсаторы или индукторы с фиксированной или механической коммутацией использовались для компенсации реактивной мощности. Однако в последние годы

были разработаны статические компенсаторы с использованием полупроводниковых тиристорных или транзисторных ключей, которые коммутируют конденсаторы и контролируют реакторы для обеспечения или поглощения требуемого количества реактивной мощности. Также использование самокоммутируемых преобразователей с соответствующей схемой управления позволяет реализовывать статические компенсаторы, способные генерировать или поглощать составляющие реактивного тока с более быстрым откликом, чем основной сигнал сети. Основываясь на использовании надежной высокоскоростной мощной электроники мощных аналитических инструментов, расширенный контроль микрокомпьютерные технологии, гибкие системы передачи переменного, также известные как FACTS, разработаны и представляют новую концепцию функционирования систем передачи энергии. В этих системах использование быстродействующих статических компенсаторов играют важную роль, позволяя увеличить количество передачи полезной мощности через существующую линию, не ставя под угрозу пределы устойчивости. Эти возможности возникают благодаря способностям специальных статических компенсаторов регулировать взаимосвязанные параметры, которые регулируют работу системы передачи, включая шунтирующий импеданс, ток, напряжение, фазовый угол и затухание колебаний.

В линейной цепи реактивная мощность определяется как составляющая мгновенной мощности переменного тока с частотой равной 100-120 Гц в системе 50 или 60 Гц. Реактивная мощность, генерируемая источником питания переменного тока, сохраняется в конденсаторе или реакторе в течение четверти периода, и в следующем периоде отправляется обратно в источник питания. Другими словами, реактивная мощность колеблется между источником переменного тока и конденсатором или реактором, а также между ними, с частотой, равной двукратной номинальной величине (50 или 60 Гц). По этой причине реактивная может быть скомпенсирована, избегая ее циркуляции между нагрузкой (индуктивной или емкостной) и источником, и, следовательно, улучшая стабильность напряжения в энергоси-

стеме. Компенсация мощности может быть реализована с помощью статических полупроводниковых генераторов, соединенных параллельно или последовательно.

На рисунках 3.26, 3.27 показаны принципы и действия компенсации реактивной мощности шунта в базовой системе переменного тока, которая содержит источник  $U_1$ , линию электропередачи и типичную индуктивную нагрузку. На рисунке показана система без компенсации и связанная с ней фазовая диаграмма. На фазовой диаграмме фазовый угол тока связан с нагрузкой, что означает, что активный ток  $I_p$  находится в фазе с напряжением нагрузки  $U_2$ . Поскольку предполагаемая нагрузка индуктивная, она требует реактивной мощности и, следовательно, источник должен ею снабжать, увеличивая ток через генератор.

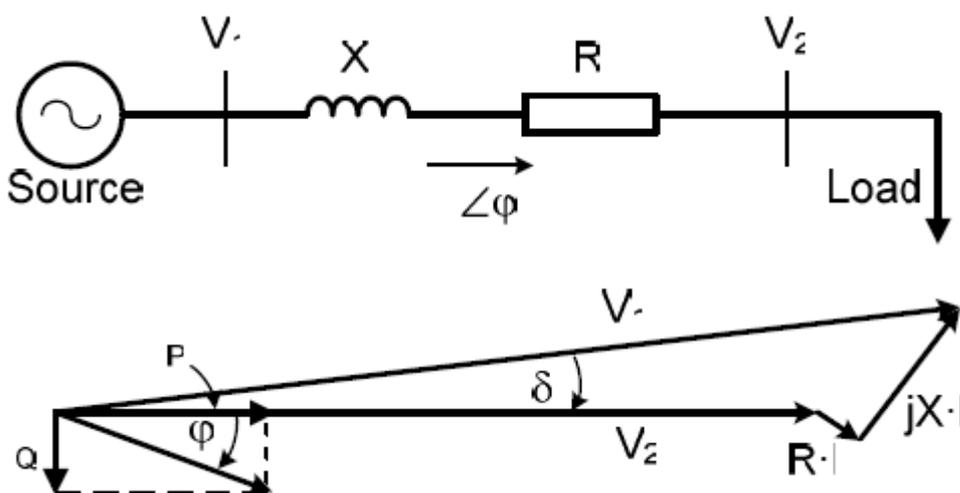


Рисунок 3.26 - Система без компенсации реактивной мощности

Если реактивная мощность подается рядом с нагрузкой, ток линии может быть уменьшен или сведен к минимуму, уменьшая потери мощности и улучшая регулирование напряжения на клеммах нагрузки. Это может быть выполнено тремя способами: а) с конденсатором, б) с источником напряжения или в) с источником тока.

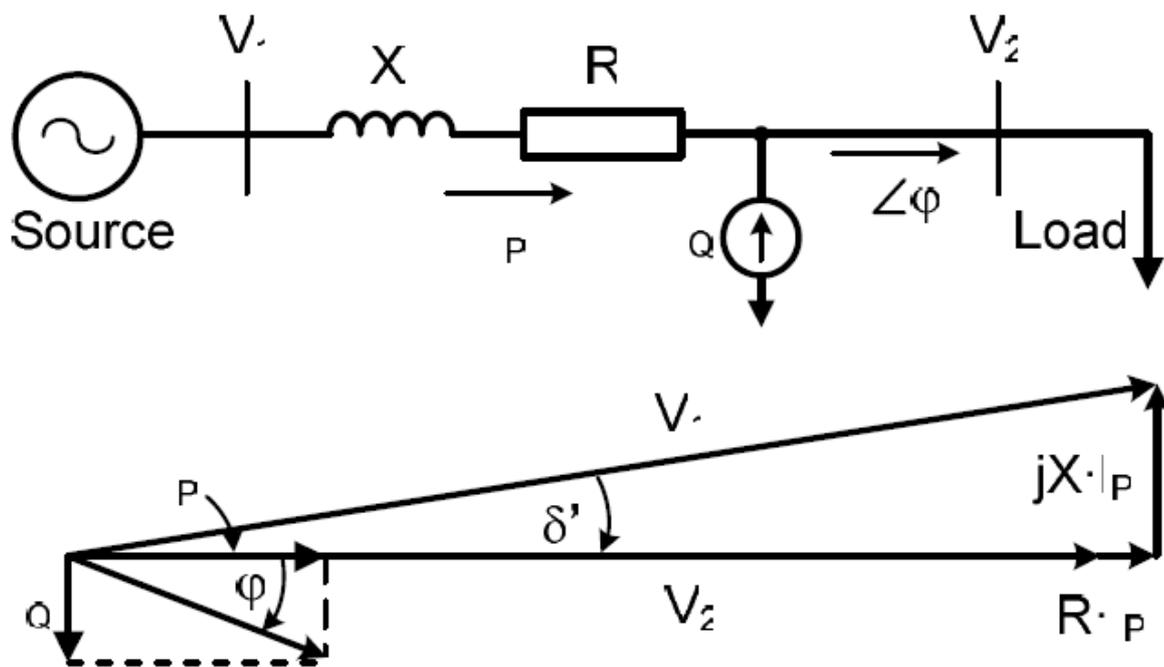


Рисунок 3.27 Компенсация с источником тока

Устройство источника тока используется для компенсации реактивной составляющей тока нагрузки ( $I_H$ ). В результате регулирование напряжения в сети улучшается, и реактивная составляющая текущего источника уменьшается или почти устраняется.

Если нагрузка требует поперечной компенсации, тогда потребуется индуктор. Также источник тока или источник напряжения могут использоваться для индуктивного шунта компенсации. Основными преимуществами использования источников напряжения или тока компенсации (вместо индукторов или конденсаторов) заключается в том, что генерируемая реактивная мощность не зависит от напряжения в точке соединения.

Применение самокоммутируемых преобразователей как средства компенсации реактивной мощности является эффективным решением. Эта технология была использована для внедрения более сложного компенсаторного оборудования.

Компенсаторы реактивной мощности, способны генерировать или поглощать реактивную мощность, не требуя больших конденсаторов или ре-

акторов. Возможно несколько подходов работы преобразователя: в качестве источника тока или напряжения. Подход в качестве источника тока, показанный на рисунке 3.28 использует реактор, снабжаемый регулируемым постоянным током, а преобразователь напряжения, показанный на рис. 3.29, использует конденсатор с регулируемым постоянным напряжением.

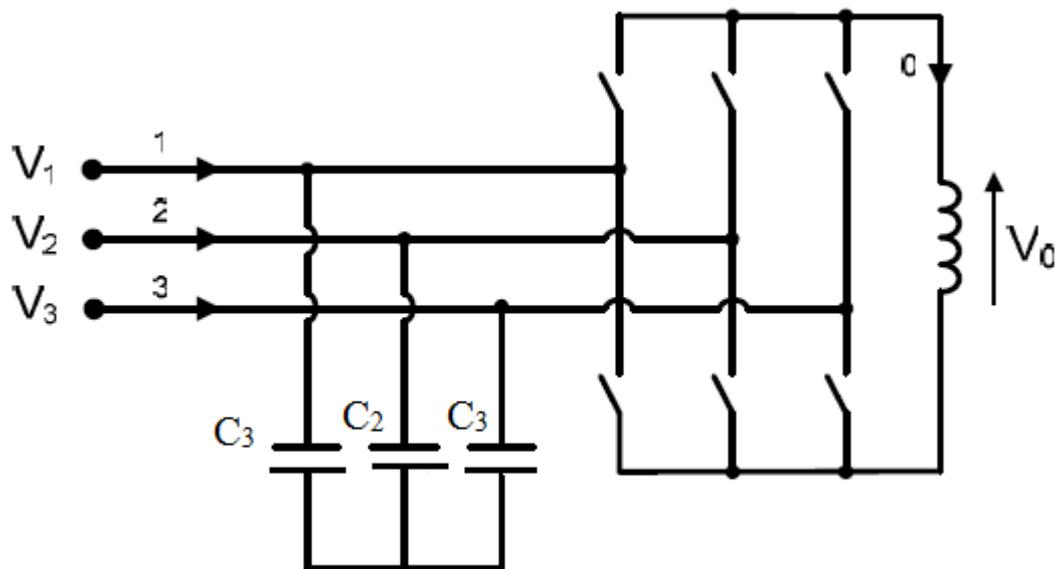


Рисунок 3.28 - Схема компенсатора, реализованная с помощью преобразователя тока.

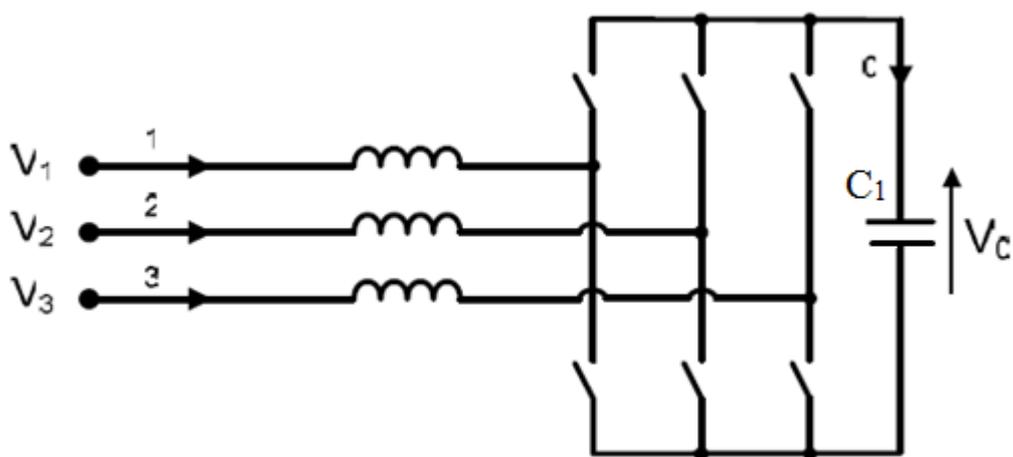


Рисунок 3.29 Схема компенсатора, реализованная с помощью преобразователя напряжения.

Основные преимущества самокоммутируемого (рисунок 3.30) компенсатора являются значительным уменьшением размера, Потенциальное снижение затрат, достигнутое в результате ликвидации Большого количества пассивных компонентов и более низкий относительный Емкости для полупроводниковых переключателей. Из-за его меньшего размера, самокоммутируемый VAR Компенсаторы хорошо подходят для устройств, где пространство является основополагающим критическим фактором. Саморегулируемые компенсаторы используются для стабилизации сети, улучшают регулирование напряжения, меняют коэффициент мощности, а также осуществляют правильный баланс нагрузки. Более того, они могут быть использованы для реализации шунтирующих и последовательных компенсаторов. На рисунке 16 показан шунтирующий компенсатор реактивной мощности, выполненный с усилителем напряжения источника. Пренебрегая внутренними потерями мощности преобразователь осуществляет контроль реактивной мощности путем регулирования амплитуды выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Когда  $U_{\text{ВЫХ}}$  больше напряжения  $U_{\text{КОМП}}$  компенсатор генерирует реактивную мощность, а когда  $U_{\text{ВЫХ}}$  меньше, чем  $U_{\text{КОМП}}$ , компенсатор поглощает реактивную мощность. Его принцип работы подобен принципу синхронной машины. Компенсация тока может быть ведущей или отстающей, в зависимости от относительной амплитуды  $U_{\text{КОМП}}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Напряжение конденсатора  $U_C$ , подключенного к каналу постоянного тока преобразователя, поддерживается постоянным и равным опорному значению  $U_{\text{ОП}}$  со специальной обратной связью управляющего контура, который управляет углом фазового сдвига между  $U_{\text{КОМП}}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$ .

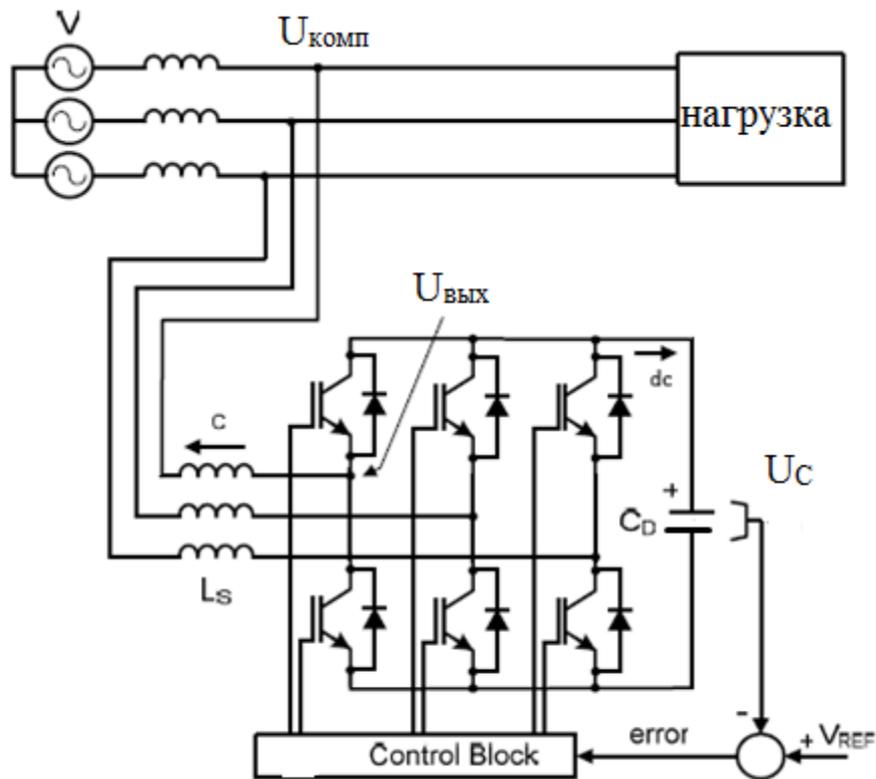


Рисунок 3.30 Самокоммутируемый компенсатор реактивной мощности

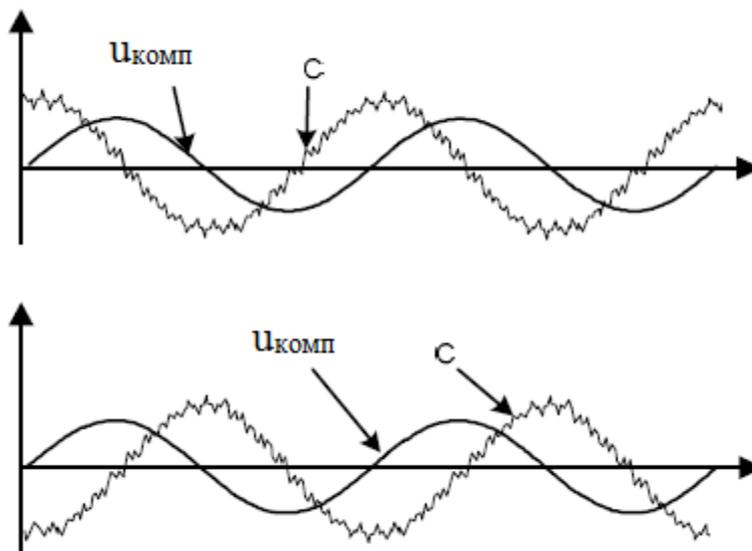


Рисунок 3.31 Имитированный ток и напряжение для опережающей ( $U_{\text{ВЫХ}} > U_{\text{КОМП}}$ ) и запаздывающей компенсации ( $U_{\text{ВЫХ}} < U_{\text{КОМП}}$ )

Амплитуду выходного напряжения компенсатора можно контролировать, изменяя способ переключения или путем изменения амплитуды напряжения постоянного тока преобразователя  $U_C$ . Более быстрый ответ времени достигается путем изменения модуляции переключения. Величина напряже-

ния постоянного тока преобразователя  $U_C$  изменяется путем регулировки небольшого количества активной мощности поглощается преобразователем и определяется по формуле:

$$P = \frac{V_{COMP} \cdot V_{MOD}}{X_s} \sin(\delta)$$

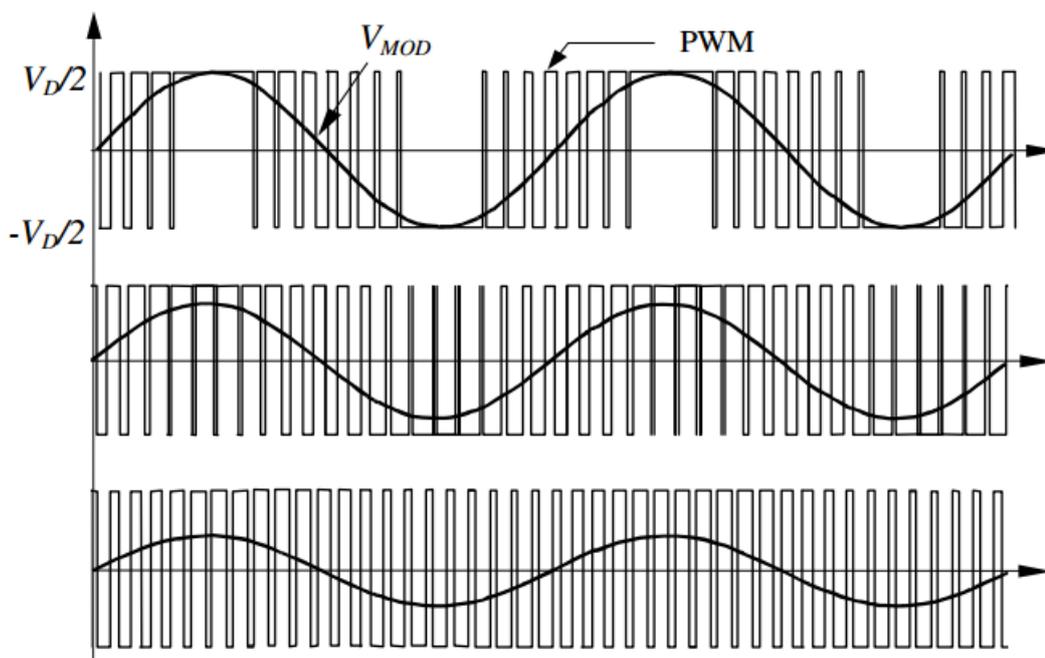


Рисунок 3.32. Импульсное выходное напряжение с различной модуляцией.

Одна из основных проблем, которые необходимо решить для использования самокоммутируемых преобразователей в высоковольтных системах является ограниченная емкость, управляемая полупроводниками (IGBT

и IGCT), доступная на рынке. Фактически полупроводники могут обрабатывать несколько тысяч ампер и от 6 до 10 кВ возможность блокировки обратного напряжения, что явно недостаточно для машин высокого напряжения.

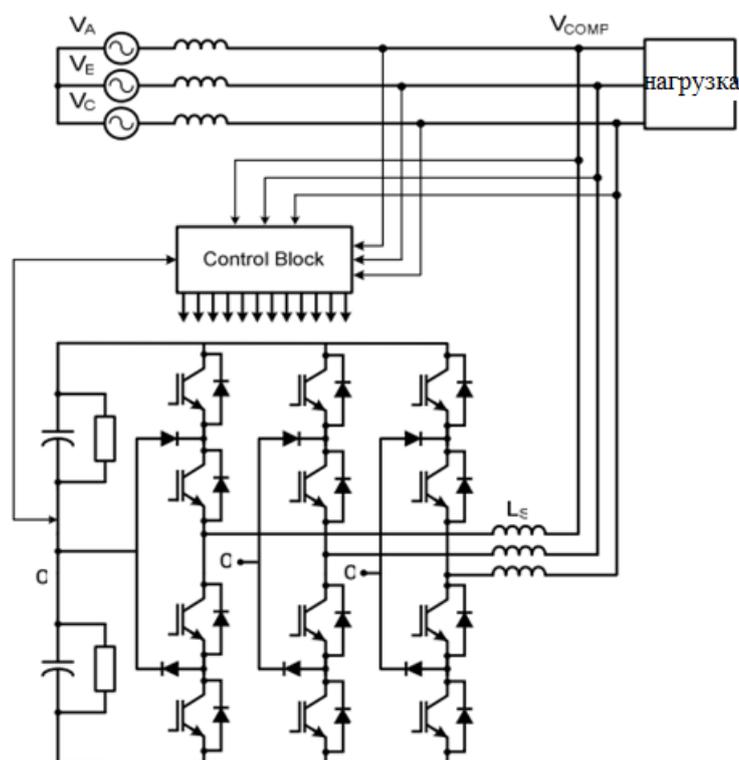


Рисунок 3.33. Компенсатор полупроводниковый, реализованный с трехфазным инвертором

На рисунке 3.33 показан компенсатор, который реализован с инвертором. Преимуществом трехуровневых преобразователей является то, что они могут уменьшить генерируемый гармонический спектр, поскольку они создают сигнал напряжения с большим количеством уровней, чем традиционная двухуровневая схема. Другим преимуществом является то, что они могут снизить номинальное напряжение полупроводников и частоту коммутаций. Трехфазные преобразователи состоят из 12 транзисторов IGBT, каждый из которых шунтируется обратным параллельно подключенным силовым диодом, шесть диодных ветвей подключены между средней точкой шины связи постоянного тока и серединой каждой пары переключателей, как показано на рисунке 3.34. Последовательное подключение источника постоянного тока к выходу преобразователя может создавать набор сигналов ШИМ, в которой частота, амплитуда и фаза переменного напряжения могут быть изменены с помощью соответствующих сигналов управления.

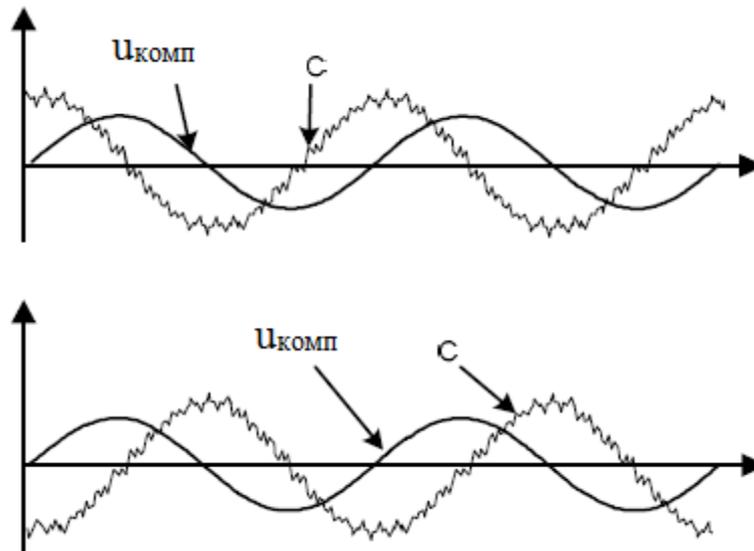


Рисунок 3.34 Имитированный ток и напряжение для опережающей ( $U_{\text{вых}} > U_{\text{комп}}$ ) и запаздывающей компенсации ( $U_{\text{вых}} < U_{\text{комп}}$ )

Амплитуда выходного напряжения компенсатора ( $U_{\text{вых}}$ ) можно контролировать, изменяя переключение (рисунок.3.40) или путем изменения амплитуды напряжения постоянного тока преобразователя  $U_C$ . Более быстрый ответ по времени достигается путем изменения модуляции шаблона переключения вместо  $U_C$ . Величина напряжения постоянного тока преобразователя  $U_C$  изменяется путем регулировки небольшого количества активной мощности, которая поглощается преобразователем и определяется по формуле:

$$P = \frac{V_{\text{COMP}} \cdot V_{\text{MOD}}}{X_s} \sin(\delta)$$

Одна из основных проблем, которые необходимо решить для использования самокоммутируемых преобразователей в высоковольтных системах является ограниченная емкость управляемых полупроводников (IGBT и IGCT), доступных на рынке. Фактические полупроводники могут обрабатывать несколько тысяч ампер и от 6 до 10 кВ обратного напряжения, что явно недостаточно для схем высокого напряжения. Эта проблема может быть решена с помощью более сложных преобразователей.

На рисунке 3.35 показан статический компенсатор, реализованный с трехуровневой нейтральной точкой. Трехуровневые преобразователи становятся стандартной схемой для преобразователя среднего напряжения таких устройств, как машинные приводы и активный интерфейс выпрямителя. Преимуществом трехфазных преобразователей является то, что они могут уменьшить генерируемый гармонический спектр, поскольку они создают сигнал напряжения с большим количеством уровней, чем традиционная двухуровневая схема. Другим преимуществом является то, что они могут снизить номинальное напряжение полупроводников и частоту коммутаций. Трехуровневые преобразователи состоят из 12 самокоммутируемых полупроводников, таких как IGBT или IGCT, каждый из которых шунтируется обратным параллельно подключенным силовым диодом. Шесть диодных ветвей подключены между средней точкой шины связи постоянного тока и серединой каждой пары транзисторов, как показано на рисунке 3.41.

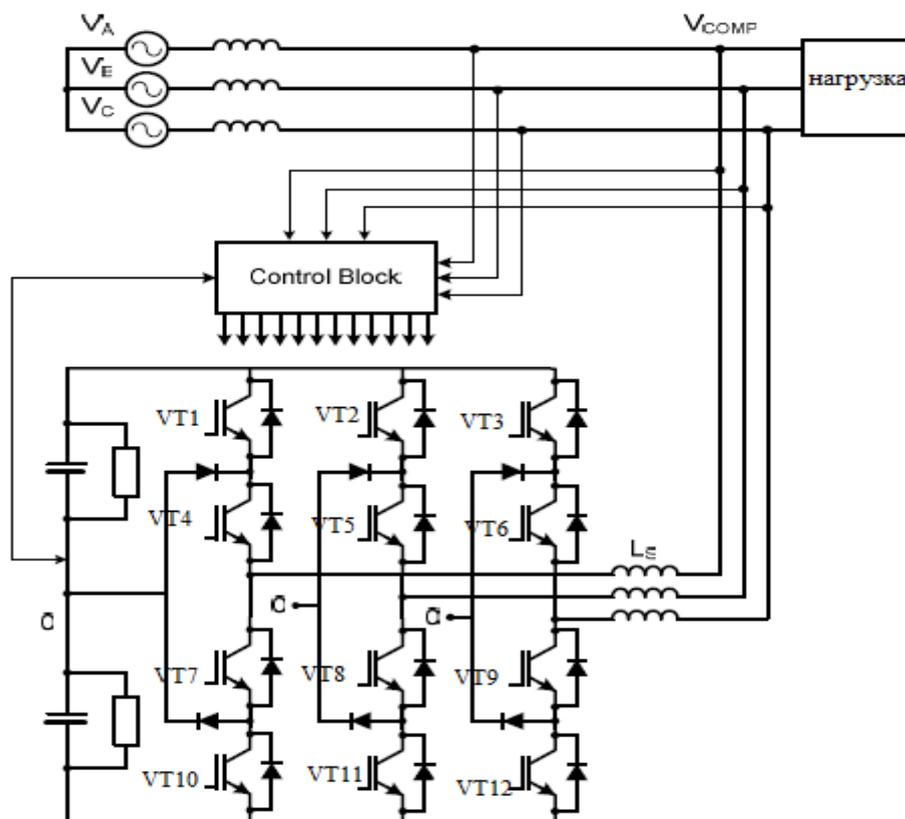


Рисунок 3.35 - Шунтирующий компенсатор, выполненный с трехфазным инвертором

Последовательное подключение источника постоянного тока к выходу преобразователя может создавать набор сигналов ШИМ, в котором частота, амплитуда и фаза напряжения может быть изменена с помощью соответствующих сигналов управления.

Еще одна технология, которая была успешно применена использует «Н» мосты, как показано на рисунке 3.36, подключенные к цепи через силовые трансформаторы. Эти трансформаторы соединены параллельно со стороны преобразователя и последовательно на стороне цепи [25]. Система использует СШИМ (синусоидальная широтно-импульсная модуляция) с треугольной формой импульсов, сдвинутых в зависимости от количества преобразователей, соединенных в цепочке мостов, форма сигнала напряжения становится все более синусоидальной формы. Рисунок 3.36 показывает одну часть этой схемы, реализованной на восьми «Н» мостах. На рисунке 3.37 показаны формы волны напряжения, полученных как функция зависимости от количества «Н» мостов преобразователя.

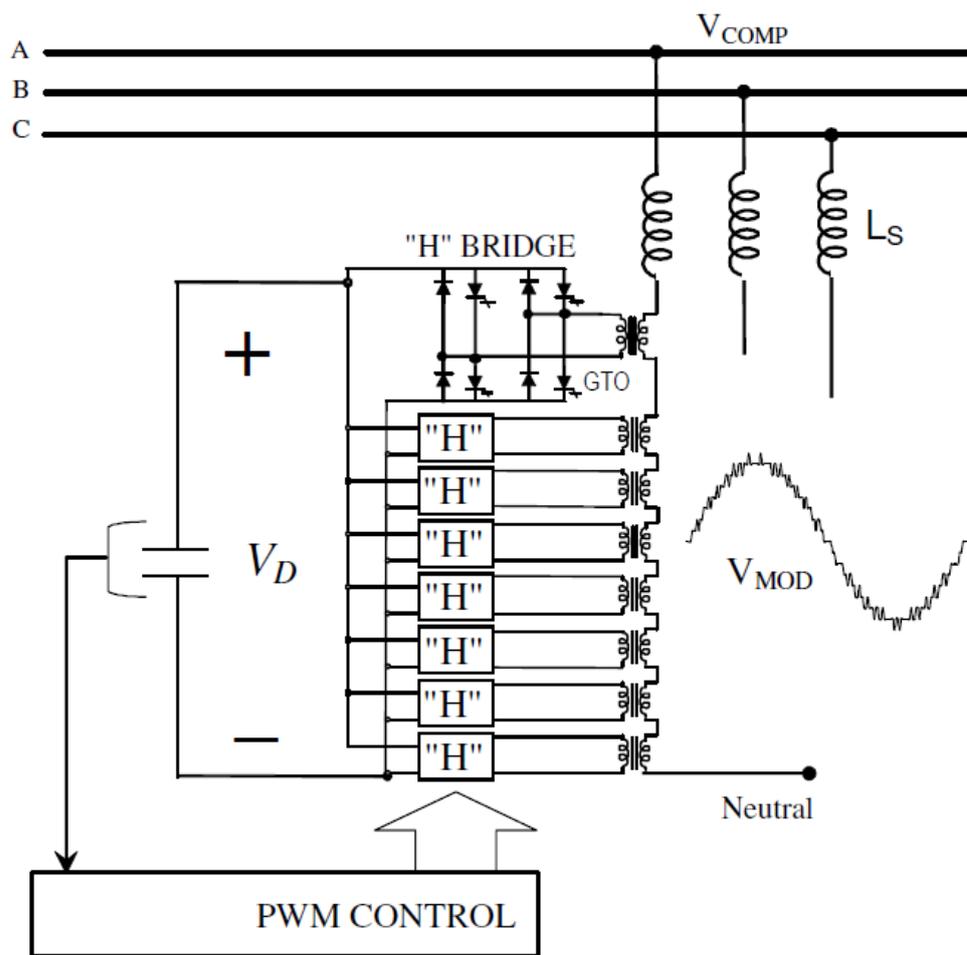


Рисунок 3.36 - Многоуровневый преобразователь с восемью «Н» мостами.

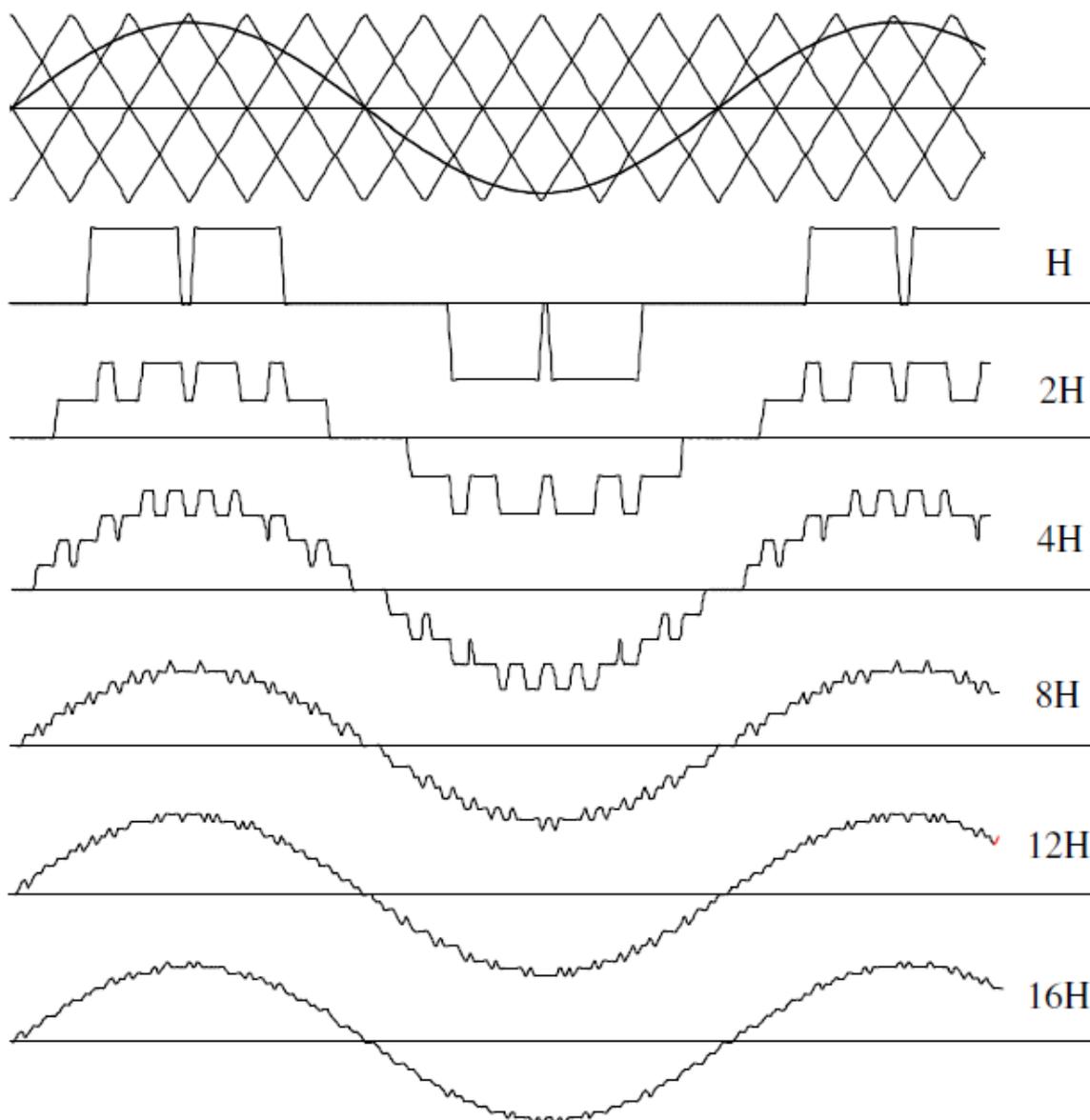


Рисунок 3.37 - Качество напряжения в зависимости от количества мостов

Интересным моментом этого преобразователя является то, что напряжения модулируются по длине импульса и амплитуда (ШИМ и АМ). Это связано с тем, что когда импульс модуляции изменяется, шаги амплитуды также изменяются. Максимальное количество шагов результирующего напряжения равно удвоенному числу периодов преобразователя плюс нулевой уровень.

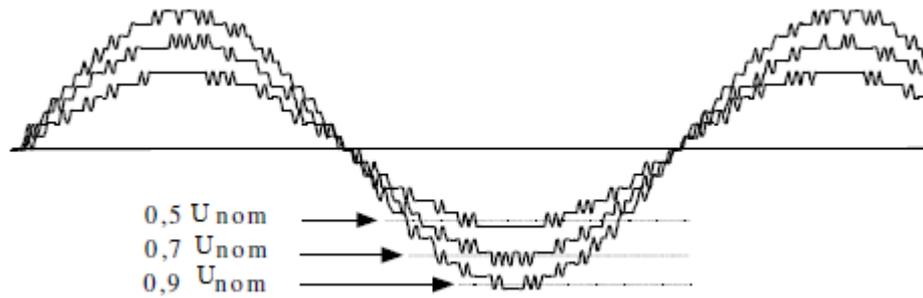


Рисунок 3.38 Амплитудная модуляция.

Количество уровней может быстро увеличиваться с несколькими преобразователями, когда применяется определение напряжения. Как и на рисунке 3.36, схема на рисунке 3.39 имеет общую связь постоянного тока с изоляцией напряжения через выход трансформатора, соединенного последовательно.

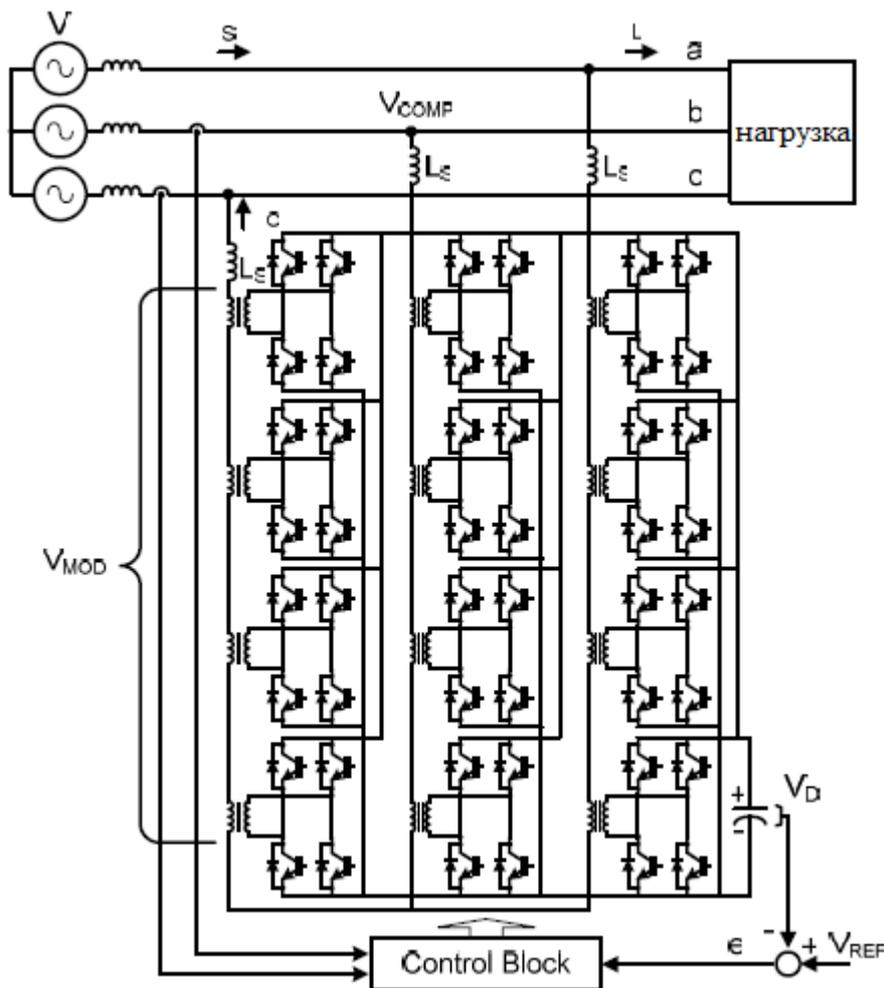


Рисунок 3.39 - Четырехступенчатый полупроводниковый компенсатор 81 уровневый, использующий «N» мосты, масштабируемые по мощности.

Однако, напряжение на стороне линии масштабируются по мощности трижды. Используя такой метод, количество шагов напряжения максимально и несколько преобразователей обеспечивают получение почти синусоидальных колебаний напряжения. В примере на рисунке 3.40 амплитудная модуляция с 81 уровнем напряжения, полученная с использованием только четырех преобразователей «H» на фазу (четырёхфазный инвертор). Таким образом, могут быть реализованы компенсаторы полупроводниковые с «свободными» от гармоник характеристиками.

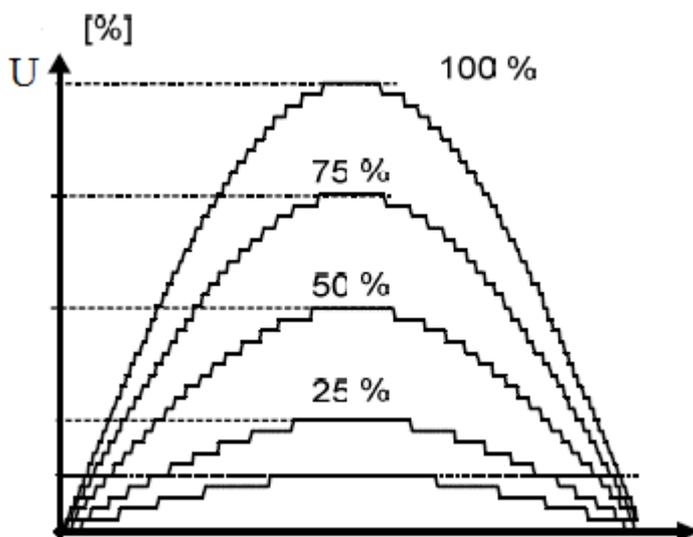


Рисунок 3.40 - Выходное напряжение преобразователя с использованием амплитудной модуляции

Важно отметить, что мост с более высоким напряжением коммутируется на частоте линии, что является основным преимуществом этой схемы для высокой мощности нагрузки.

Три наиболее подходящих ключа для устройств компенсации: тиристоры, биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT) и интегрированные управляемые тиристоры (IGCT). Эта область применения требует, чтобы полупроводник имел возможность блокировать высокие напряжения, порядка киловольт. Высоковольтные IGBT, необходимые для применения в самокоммутируемых преобразователях достигают уровня 6.5кВ, что позволяет создавать схемы с мощностью от нескольких МВт. Кроме того, IGCT теперь достигают уровня 6 кВ. Возможно, самое важное в развитии полупро-

водников для устройств компенсации является триггерный тиристор (ЛТТ). Это устройство является самым важным для применения в сверхвысокой мощности. Недавно ЛТТ устройства были разработаны с возможностью до работы на напряжении 13,5 кВ и ток до 6 кА. Эти новые устройства уменьшают количество элементов последовательно и параллельно, уменьшая, следовательно, количество ключей и защиту схем. С помощью этих элементов можно снизить стоимость и увеличить реактивную мощность в установках компенсации до нескольких сотен МВар.

На основе преобразователей силовой электроники и цифровых схем управления, компенсаторы реактивной мощности, реализованные с помощью самокоммутируемых преобразователей, были разработаны не только для компенсации реактивной мощности, но и для регулирования напряжения, пульсаций первой гармоники, активной и реактивной мощности, импеданса линии передачи и угла сдвига фаз. Важно отметить, что, хотя конечный эффект это повышение производительности энергосистемы, управляющая переменная которой во всех случаях, это реактивная мощность.

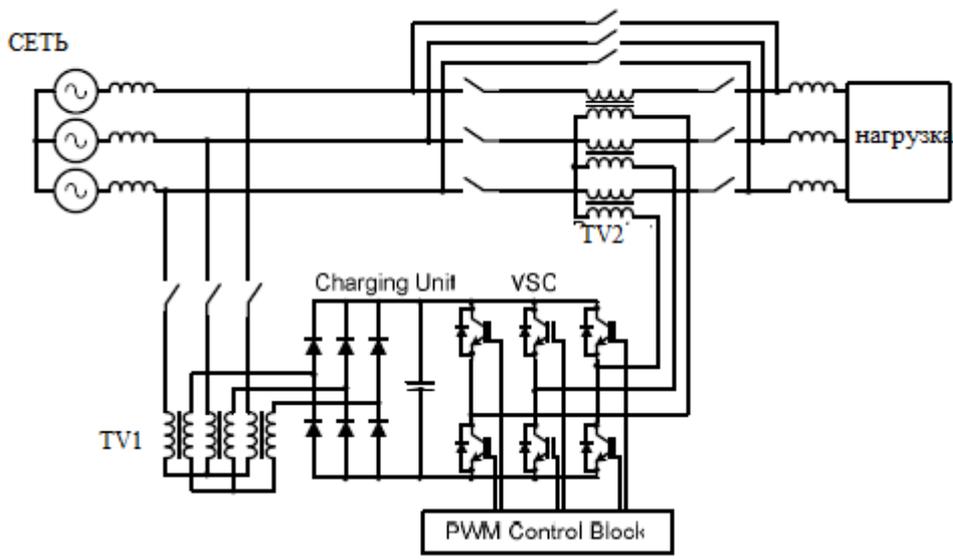


Рисунок 3.41 - Полупроводниковый компенсатор на IGBT транзисторах

При наличии уменьшения напряжения или колебаний на нагрузке устройство реагирует путем приложения переменного напряжения последовательно с входящим трехфазным сетевым напряжением, компенсируя раз-

ницу напряжений. Каждая фаза подаваемого напряжения может контролироваться отдельно (их величина и угол). Активная и реактивная мощность, необходимая для генерирования этих напряжений обеспечивается напряжением преобразователя источника, подаваемым от источника постоянного тока, как показано на рисунке 3.41.

### **Заключение**

В данной работе было проведено исследование влияния полупроводникового компенсатора на качество компенсации различных нагрузок. Была выбрана система промышленная сеть – полупроводниковый компенсатор – нагрузка и проведено ее моделирование в MATLAB Simulink. Показано влияние нагрузок на требуемые параметры компенсатора индуктивность и емкость конденсатора силовой схемы. Проведен обзор существующих схем полупроводниковых статических компенсаторов, исследований и проблем в области энергоэффективности.

Система управления позволяет поддерживать на заданном уровне действующее напряжение на нагрузке на протяжении всего времени работы устройства, осуществляя, таким образом, стабилизацию параметров работы. Дополнительно система управления выполняет пускозащитные функции. В ней предусмотрена аварийная остановка схемы при превышении допустимых параметров тока. Во всех режимах система сигнализирует о неисправности.

## Список использованной литературы

1. H. Jin, G. Goós and L. Lopes, "An Efficient Switched-Reactor-Based Static Var Compensator", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, N° 4, July/August 1994, pp. 997-1005.
2. J. W. Dixon , Y. del Valle, M. Orchard, M. Ortúzar, L.Morán and C. Maffrand, "A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.50, N° 5, October 2003, pp. 982-989.
3. Juan Dixon and Luis Morán, "A Clean Four-Quadrant Sinusoidal Power Rectifier, Using Multistage Converters for Subway Applications", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 52, N° 3, June 2005.
4. Rolf Grünbaum, Åke Petersson and Björn Thorvaldsson, "FACTS, Improving the performance of electrical grids", ABB Review, March 2003, pp. 11-18.
5. T. J. Miller, "Reactive power Control in Electric Systems," John Willey & Sons, 1982.
6. Бар В. И. Электротехнологические установки и их источники питания : Основы теории и проектирования : учеб. пособие / В. И. Бар; ТГУ ; Электротехн. фак. ; каф. "Пром. электроника". - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2009. - 154 с. : ил. - Библиогр.: с. 151-153. - 49-55
7. Баранов В. Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы (+CD), 2-е изд. испр. -М.: Издательский дом «Додэка-XX1», 2006. 288 е.: ил. (серия «Мировая электроника»).
8. Башарин С.А., Федоров В.В. Теоретические основы электротехники: Теория электрических цепей и электромагнитного поля 4-е изд., перераб. и доп., 4-е изд., перераб. и доп., ВУЗ.
9. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для студентов электротехнических, энергетических и

приборостроительных специальностей вузов. -7-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. Школа, 1978 - 528 е., ил.

10. Васильев А.С. Перспективы совершенствования источников питания для сварки и резки // Сварочное производство, 1995 №5 С. 32-33.

11. Васильев А. А., Крючков И. П. Электрическая часть станций и подстанций / Под ред. А. А. Васильева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

12. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.

13. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышения качества электроэнергии. М.: Энерго – атомиздат, 1985. 224 с.

14. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.

15. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М.: Высш. Школа, 1982. 496 с.

16. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учеб.пособ./ Зиновьев, Г.С. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 664с.

17. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1976.

18. Карпов. Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 БХВ-Петербург, 2006 г., 400 стр.

19. Кит Сукер Силовая электроника. Руководство разработчика (Power Electronics Design: A Practitioner's Guide) Додэка XXI, 2008 г., 256 стр.

20. Плис А.И., Сливина Н.А. Mathcad. Математический практикум для инженеров и экономистов: Учеб. Пособие. 2-е изд., перераб. И. доп. - М.: Финансы и статистика, 2003. - 656 е.: ил.

21. Полянин А. Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2001.

22. Правила электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 2000.

23. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В. Современные методы улучшения качества электрической энергии // Электротехника. 1998 №3 С. 10- 17.

24. Российская научно-техническая конференция «Современные проблемы сварочной науки и техники «Сварка-95» №9
25. Рыськова З.А. и др. Трансформаторы для электрической контактной сварки/ З.А. Рыськова, П.Д. Федоров, В. И. Жимерева.- 3-е изд., перераб. И доп. JL: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990-424 е.: ил.
26. Сварка в машиностроении: Справочник. М.: Машиностроение, 1979.-Т. 4.
27. Семенов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов СОЛОН, 336 стр.
28. Смирнов С.С., Коверникова Л.И. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети // Электричество №1,1996.
29. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / Под ред. Р.М. Матура. М.: Энергоатомиздат. 1987.
- 30.Суворова И. А. Электротехнологические промышленные установки и освещение : учеб. пособие для вузов / И. А. Суворова; Вятский гос. ун-т. - ВУЗ/изд. - Киров : ВятГУ, 2007. - 97 с. : ил. - 115-00
31. Худяков В.А. и др. Управляемый статический источник реактивной мощности. Электричество, 1969, № 1.
- 32.Шевцов А.А., Глибин Е.С. Имитационное моделирование совместной работы статических компенсаторов и контактной сварочной машины // Электротехника. 2010. № 4. С. 34–38.
- 33.Шевцов А.А., Глибин Е.С. Источник питания контактной сварочной машины: патент на изобретение RUS 2421311 08.04.2009.
- 34.Шевцов А.А., Глибин Е.С. Моделирование работы компенсационных устройств совместно с контактными сварочными установками // Сварочное производство №5, 2009 г. – с. 17 – 21.
35. Шевцов А.А., Глибин Е.С. Ценовые аспекты выбора компенсатора неактивных составляющих мощности при работе с контактными сварочными машинами // Вестник СамГТУ №2, 2009